



















**MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBRES****Publication number:** JP2002517793 (T)**Publication date:** 2002-06-18**Inventor(s):****Applicant(s):****Classification:**

**- international:** *B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; C03B37/028; C03B37/075; G02B6/02; G02B6/032; G02B6/10; G02B6/122; H01S3/06; H01S3/067; H01S5/10; B29D11/00; C03B37/012; C03B37/02; C03B37/075; G02B6/02; G02B6/10; G02B6/122; H01S3/06; H01S5/00; (IPC1-7): G02B6/20*

**- European:** *G02B6/032; B29D11/00G10; C03B37/012B2C; C03B37/027H; C03B37/028; C03B37/075; G01N21/03B; G02B6/02; G02B6/02P6C2A; G02B6/02P6C6; G02B6/02P6K2; G02B6/02P6K2M; G02B6/02P6K4; G02B6/02P6K10; G02B6/10P; G02B6/122P; Y01N10/00*

**Application number:** JP20000553842T 19990521**Priority number(s):** DK19980000779 19980609; WO1999DK00279 19990521**Also published as:**

 WO9964903 (A1)  
 US6539155 (B1)  
 US6845204 (B1)  
 NZ509201 (A)  
 JP2002517794 (T)  
 EP1086391 (A1)  
 EP1086391 (B1)  
 EP1086393 (A1)  
 EP1086393 (B1)  
 WO9964904 (A1)  
 CA2334554 (A1)  
 CA2334510 (A1)  
 AU3810699 (A)  
 AU755547 (B2)  
 AU3026099 (A)  
 AU755223 (B2)  
 AT266214 (T)  
 AT268482 (T)

&lt;&lt; less

Abstract not available for JP 2002517793 (T)

Abstract of corresponding document: **WO 9964903 (A1)**

The present invention relates to a new class of optical waveguides, in which waveguiding along one or more core regions is obtained through the application of the Photonic Bandgap (PBG) effect. The invention further relates to optimised two-dimensional lattice structures capable of providing complete PBGs, which reflects light incident from air or vacuum. Such structures may be used as cladding structures in optical fibres, where light is confined and thereby guided in a hollow core region. In addition, the present invention relates to designs for ultra low-loss PBG waveguiding structures, which are easy to manufacture. Finally, the present invention relates to a new fabrication technique, which allows easy manufacturing of preforms for photonic crystal fibers with large void filling fractions, as well as it allows a high flexibility in the design of the cladding and core structures.

Data supplied from the **esp@cenet** database — Worldwide

## Family list

18 application(s) for: JP2002517793 (T)

**1 MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBRES****Inventor:** BROENG JES [DK] ; LIBORI STIG EIGIL BARKOU [DK] (+1)**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15)**Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS [DK]**IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+19)**Publication info:** AT266214 (T) — 2004-05-15**2 MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBRES****Inventor:** BROENG JES [DK] ; BARKOU STIG EIGIL [DK] (+1)**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15)**Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS [DK]**IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+20)**Publication info:** AT268482 (T) — 2004-06-15**3 A photonic band gap fibre****Inventor:** BROENG JES ; BARKOU STIG EIGIL (+1)**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15)**Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS**IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+20)**Publication info:** AU755223 (B2) — 2002-12-05**4 Microstructured optical fibres****Inventor:** BROENG JES ; BARKOU STIG EIGIL (+1)**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15)**Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS**IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+19)**Publication info:** AU755547 (B2) — 2002-12-12**5 A photonic band gap fibre****Inventor:** BROENG JES ; BARKOU STIG EIGIL (+1)**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15)**Applicant:** BROENG JES ; BARKOU STIG EIGIL (+1)**IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+18)**Publication info:** AU3026099 (A) — 1999-12-30**6 Microstructured optical fibres****Inventor:** BROENG JES ; BARKOU STIG EIGIL (+1)**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15)**Applicant:** BROENG JES ; BARKOU STIG EIGIL (+1)**IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+18)**Publication info:** AU3810699 (A) — 1999-12-30**7 MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBRES****Inventor:** BJARKLEV ANDERS OVERGAARD [DK] ; BARKOU STIG EIGIL [DK] (+1)**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15)**Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS [DK]**IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+19)**Publication info:** CA2334510 (A1) — 1999-12-16**8 A PHOTONIC BAND GAP FIBRE****Inventor:** BARKOU STIG EIGIL [DK] ; BJARKLEV ANDERS OVERGAARD [DK] (+1)**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15)**Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS [DK]**IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+20)**Publication info:** CA2334554 (A1) — 1999-12-16**9 MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBRES****Inventor:** BROENG JES [DK] ; LIBORI STIG EIGIL BARKOU [DK] (+1)**Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS [DK]

**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15) **IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+19)

**Publication info:** EP1086391 (A1) — 2001-03-28  
EP1086391 (B1) — 2004-05-06

## 10 A PHOTONIC BAND GAP FIBRE

**Inventor:** BROENG JES [DK] ; BARKOU STIG EIGIL [DK] (+1) **Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS [DK]

**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15) **IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+20)

**Publication info:** EP1086393 (A1) — 2001-03-28  
EP1086393 (B1) — 2004-06-02

## 11 Microstructured optical fibres

**Inventor:** BROENG JES [DK] ; BARKOU STIG EIGIL [DK] (+1) **Applicant:** CRYSTAL FIBRE AS [DK]

**EC:** G02B6/02P6C6; C03B37/012B2C; (+5) **IPC:** C03B37/012; C03B37/027; G02B6/02; (+7)

**Publication info:** EP1460460 (A2) — 2004-09-22  
EP1460460 (A3) — 2005-09-07

## 12 MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBRES

**Inventor:** **Applicant:**

**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15) **IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+19)

**Publication info:** JP2002517793 (T) — 2002-06-18

## 13 MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBRES

**Inventor:** **Applicant:**

**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15) **IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+20)

**Publication info:** JP2002517794 (T) — 2002-06-18

## 14 Microstructured optical fibres

**Inventor:** BROENG JES ; BARKOU STIG EIGIL (+1) **Applicant:** JES BROENG ; STIG EIGIL BARKOU (+1)

**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15) **IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+19)

**Publication info:** NZ509201 (A) — 2002-11-26

## 15 Microstructured optical fibres

**Inventor:** BROENG JES [DK] ; BARKOU STIG EIGIL [DK] (+1) **Applicant:** BROENG JES, ; BARKOU STIG EIGIL, (+1)

**EC:** G02B6/032; B29D11/00G10; (+15) **IPC:** B29D11/00; C03B37/012; C03B37/027; (+19)

**Publication info:** US6539155 (B1) — 2003-03-25

---

Data supplied from the esp@cenet database — Worldwide

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号  
特表2002-517793  
(P2002-517793A)

(43) 公表日 平成14年6月18日 (2002.6.18)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>  
G 0 2 B 6/20

識別記号

F I  
G 0 2 B 6/20

ターコード\* (参考)  
Z 2 H 0 5 0

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 97 頁)

(21) 出願番号 特願2000-553842(P2000-553842)  
(86) (22) 出願日 平成11年5月21日 (1999.5.21)  
(85) 翻訳文提出日 平成12年12月11日 (2000.12.11)  
(86) 国際出願番号 P C T / D K 9 9 / 0 0 2 7 9  
(87) 国際公開番号 W O 9 9 / 6 4 9 0 3  
(87) 国際公開日 平成11年12月16日 (1999.12.16)  
(31) 優先権主張番号 P A 1 9 9 8 0 0 7 7 9  
(32) 優先日 平成10年6月9日 (1998.6.9)  
(33) 優先権主張国 デンマーク (D K)

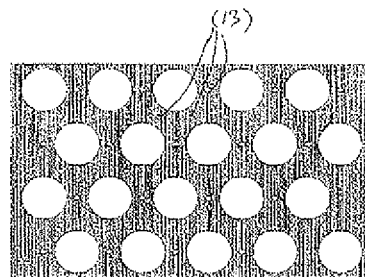
(71) 出願人 クリスタル フィブレ アクティーゼルス  
カブ  
デンマーク国, デーコー-2605 プレーン  
ビュー, プリオルパルケン 878  
(72) 発明者 プレン, イェス  
デンマーク国, デーコー-2800 リュンビ  
ュー, 1. テーベ, ネルガールドスバイ  
22ペー  
(72) 発明者 バルコウ, ステイグ エイギル  
デンマーク国, デーコー-2820 ゲントフ  
テ, 1. テーベ, リュンビューバイ  
431ペー  
(74) 代理人 弁理士 石田 敬 (外4名)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 微細構造光ファイバ

(57) 【要約】

本発明は、1つあるいはそれ以上のコア領域に沿っての導波が光バンドギャップ (P B G) 効果の利用によって得られる新しい種類の光導波管に関するものである。本発明はさらに、空気あるいは真空中から入射する光を反射する、完全な P B G を提供できる最適化された2次元格子構造に関するものである。このような構造は、光が閉じ込められ、それによって中空コア領域に誘導される光ファイバのクラッド構造として使用することができる。更に、本発明は、製造が容易で非常に低い損失の P B G 導波構造のための設計に関するものである。更にまた、本発明は、大きなボイド充填率を有する光結晶ファイバのためのプリフォームの容易な製造を可能にし、同時にクラッドおよびコア構造の設計の高い柔軟性を可能にする新しい製造技術に関するものである。



**【特許請求の範囲】**

【請求項1】 縦方向を有する導波管の構造を持つ光ファイバであって、前記光ファイバが、

前記縦方向に沿って延びるコア領域と、

前記縦方向に沿って延びるクラッド領域とを備え、該クラッド領域が、各々が前記導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する細長要素を含む少なくとも実質的に2次元の周期的な構造を含み、前記細長要素が、該細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有し、

前記周期的な構造が、前記縦方向に垂直な断面において、少なくとも1つの単位セルによって規定され、各該単位セルに対して、

2つの隣接する前記細長要素の前記中心軸間の任意の距離が $2\mu\text{m}$ を超えなくて、かつ

与えられた前記単位セル内に含まれる全ての要素の全面積の和が、該単位セルの面積の0.15倍よりも大きいことを特徴とする光ファイバ。

【請求項2】 2つの隣接する前記細長要素の中心軸間の任意の距離が、 $1.9\mu\text{m}$ よりも小さく、例えば $1.8\mu\text{m}$ よりも小さい、例えば $1.6\mu\text{m}$ よりも小さい、例えば $1.4\mu\text{m}$ よりも小さい、例えば $1.2\mu\text{m}$ よりも小さい、例えば $1.0\mu\text{m}$ よりも小さい、例えば $0.8\mu\text{m}$ よりも小さい、例えば $0.6\mu\text{m}$ よりも小さいことを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。

【請求項3】 与えられた前記単位セルに対して、該単位セル内の全要素の全面積の和が、該単位セルの面積の定数倍よりも大きく、該定数が0.2よりも大きい、例えば0.25よりも大きい、例えば0.3よりも大きい、例えば0.4よりも大きい、例えば0.5よりも大きい、例えば0.6よりも大きい、例えば0.7よりも大きい、例えば0.8よりも大きいことを特徴とする請求項1又は2に記載の光ファイバ。

【請求項4】 各前記単位セルに対して、

第1の円が、該単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ任意の前記細長要素のどの部分も囲まない可能な最大円領域として規定され、かつ

前記第1の円の中心から該第1の円の半径の1.5倍あるいはそれよりも小さ

い、例えば1.2倍あるいはそれよりも小さい、例えば1.1倍あるいはそれよりも小さい距離の範囲内にある前記細長要素の中心が3つあるいはそれ以上の辺を有する多角形の頂点を規定することを特徴とする請求項1から3までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項5】 前記多角形が正多角形であることを特徴とする請求項4に記載の光ファイバ。

【請求項6】 前記多角形が、三角形、矩形、正方形あるいは六角形であることを特徴とする請求項4又は5に記載の光ファイバ。

【請求項7】 各々が前記導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する他の細長要素をさらに含み、該他の細長要素が、細長の二次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも高い屈折率を有し、かつ各々が前記単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ前記各々が前記単位セルの面積を超えない面積を有することを特徴とする請求項1から6までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項8】 前記他の細長要素の少なくとも一部が、前記断面において、三角形構造、あるいは蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定することを特徴とする請求項7に記載の光ファイバ。

【請求項9】 前記他の細長要素の少なくとも一部が、前記断面において、少なくとも部分的に前記第1の円内に含まれることを特徴とする請求項8に記載の光ファイバ。

【請求項10】 前記他の細長要素の少なくとも一部の中心が、前記断面において、前記第1の円の中心と実質的に一致することを特徴とする請求項9に記載の光ファイバ。

【請求項11】 縦方向を持つ導波管の構造を有する光ファイバであって、前記光ファイバが、

前記縦方向に沿って延びるコア領域と、

前記縦方向に沿って延びるクラッド領域とを備え、少なくとも実質的に2次元の周期的な構造を含む前記クラッド領域が、

各々が前記の導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する細長の一次要素であって、該一次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有する前記

細長の一次要素と、

各々が前記導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する細長の二次要素であつて、該二次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有する前記細長の二次要素とを含み、

任意の前記一次要素のいかなる面積も任意の前記二次要素のいかなる面積よりも大きく、かつ

前記周期的な構造が、前記縦方向に垂直な断面において、少なくとも1つの単位セルによって規定され、各該単位セルに対して、

与えられた前記単位セル内に含まれる前記二次要素の面積の和が、該単位セルの面積の0.09倍よりも大きいことを特徴とする光ファイバ。

【請求項12】 任意の前記一次要素のいかなる面積も任意の前記二次要素のいかなる面積の定数倍よりも大きく、前記定数が、1.1よりも大きく、例えば1.2よりも大きい、例えば1.3よりも大きい、例えば1.4よりも大きい、例えば1.5よりも大きい、例えば2.0よりも大きい、例えば5.0よりも大きい、例えば10よりも大きい、例えば15よりも大きい、例えば20よりも大きい、例えば50よりも大きいことを特徴とする請求項11に記載の光ファイバ。

【請求項13】 与えられた前記の単位セルに対する、該単位セル内の前記二次要素の全面積の和の比率が、0.1よりも大きく、例えば0.15よりも大きい、例えば0.2よりも大きい、例えば0.25よりも大きい、例えば0.3よりも大きい、例えば0.4よりも大きい、例えば0.5よりも大きい、例えば0.6よりも大きいことを特徴とする請求項11又は12に記載の光ファイバ。

【請求項14】 各前記単位セルに対して、

第1の円が、該単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ任意の前記細長の一次要素のどの部分も囲まない可能な最大円面積として規定され、

前記第1の円の中心から該第1の円の半径の1.5倍あるいはそれよりも小さい、例えば1.2倍あるいはそれよりも小さい、例えば1.1倍あるいはそれよりも小さい距離の範囲内にある前記細長の一次要素の中心が3つあるいはそれ以上の辺を有する第1の多角形の頂点を規定することを特徴とする請求項11から

13までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項15】 前記第1の多角形が正多角形であることを特徴とする請求項14に記載の光ファイバ。

【請求項16】 前記細長の一次要素の少なくとも一部が、前記断面において、三角形構造を規定することを特徴とする請求項11から15までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項17】 前記細長の二次要素の中心が、前記断面において、前記第1の円の中心と決して一致しないことを特徴とする請求項14から16までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項18】 前記細長の二次要素の少なくとも一部の中心が、前記断面において、2つの隣接する前記細長の一次要素の中心を接続するラインに実質的に沿って置かれていることを特徴とする請求項11から17までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項19】 各々が前記導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する他の細長要素をさらに含み、前記他の細長要素は、該他の細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも高い屈折率を有し、かつ各々が前記単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ前記各々が前記単位セルの面積を超えない面積を有することを特徴とする請求項11から18までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項20】 前記他の細長要素の少なくとも一部が、前記断面において、三角形構造、あるいは蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定することを特徴とする請求項19に記載の光ファイバ。

【請求項21】 前記他の細長要素が、前記断面において、少なくとも部分的に前記第1の円内に含まれることを特徴とする請求項11から20までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項22】 前記他の細長要素の少なくとも一部の中心が、前記断面において、前記第1の円の中心と実質的に一致することを特徴とする請求項21に記載の光ファイバ。

【請求項23】 与えられた前記単位セルに対して、該単位セル内の前記一



次要素の全面積の和が、該単位セルの面積の定数倍よりも大きく、前記定数が0.1よりも大きい、例えば0.15よりも大きい、例えば0.2よりも大きい、例えば0.25よりも大きい、例えば0.3よりも大きい、例えば0.4よりも大きい、例えば0.5よりも大きい、例えば0.6よりも大きい、例えば0.7よりも大きい、例えば0.8よりも大きいことを特徴とする請求項11から22までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項24】 縦方向を持つ導波管構造を有する光ファイバであって、前記光ファイバが、

前記縦方向に沿って延びるコア領域と、

前記縦方向に沿って延びるクラッド領域とを備え、少なくとも実質的に2次元の周期的な構造を含む前記クラッド領域は、

各々が前記の導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する細長の一次要素であって、該一次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有する前記細長の一次要素と、

各々が前記導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する細長の二次要素であって、該二次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有する前記細長の二次要素とを含み、

任意の前記一次要素のいかなる面積も任意の前記二次要素のいかなる面積よりも大きく、かつ前記縦方向に垂直な断面において、

前記細長の一次要素が三角形構造を規定し、

前記周期的な構造は、前記縦方向に垂直な断面において、少なくとも1つの単位セルによって規定され、各該単位セルに対して、

第1の円が、該単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ任意の前記細長の一次要素のどの部分も囲まない可能な最大円領域として規定され、かつ

前記細長の二次要素のいずれの中心も、前記断面において、前記第1の円の中心と一致しないことを特徴とする光ファイバ。

【請求項25】 任意の前記一次要素のいかなる面積も任意の前記二次要素のいかなる面積の定数倍よりも大きく、前記定数が、1.1よりも大きい、例えば1.2よりも大きい、例えば1.3よりも大きい、例えば1.4よりも大きい

、例えば1.5よりも大きい、例えば2.0よりも大きい、例えば5.0よりも大きい、例えば10よりも大きい、例えば20よりも大きい、例えば50よりも大きい、例えば100よりも大きい、例えば200よりも大きい、例えば500よりも大きいことを特徴とする請求項24に記載の光ファイバ。

【請求項26】 各前記単位セルに対して、該単位セル内の前記二次要素の全面積の和が、該単位セルの面積の0.005倍よりも大きく、例えば該単位セルの面積の0.01倍よりも大きい、例えば0.05倍よりも大きい、例えば0.1倍よりも大きい、例えば0.15倍よりも大きい、例えば0.2倍よりも大きい、例えば0.25倍よりも大きい、例えば0.3倍よりも大きい、例えば0.4倍よりも大きい、例えば0.5倍よりも大きいことを特徴とする請求項24又は25に記載の光ファイバ。

【請求項27】 前記細長の二次要素の少なくとも一部が、前記断面において、三角形構造、あるいは蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定することを特徴とする請求項24から26までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項28】 前記細長の二次要素の少なくとも一部の中心が、前記断面において、2つの隣接する前記細長の一次要素の中心を接続するラインに実質的に沿って置かれていることを特徴とする請求項24から27までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項29】 各々が前記導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する他の細長要素をさらに含み、前記他の細長要素が、該他の細長い要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも高い屈折率を有し、かつ各々が前記単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ前記各々が前記単位セルの面積を超えない面積を有することを特徴とする請求項24から28までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項30】 前記他の細長要素の少なくとも一部が、前記断面において、三角形構造、あるいは蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定することを特徴とする請求項29に記載の光ファイバ。

【請求項31】 前記他の細長要素が、前記断面において、少なくとも部分的に前記第1の円内に含まれることを特徴とする請求項29又は30に記載の光

ファイバ。

【請求項32】 前記他の細長要素の少なくとも一部の中心が、前記断面において、前記第1の円の中心とほぼ一致することを特徴とする請求項31に記載の光ファイバ。

【請求項33】 与えられた前記単位セルに対して、該単位セル内の前記一次要素の全面積の和が、該単位セルの面積の定数倍よりも大きく、前記定数が0.1よりも大きく、例えば0.15よりも大きい、例えば0.2よりも大きい、例えば0.25よりも大きい、例えば0.3よりも大きい、例えば0.4よりも大きい、例えば0.5よりも大きい、例えば0.6よりも大きい、例えば0.7よりも大きい、例えば0.8よりも大きいことを特徴とする請求項24から32までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項34】 前記の細長要素に隣接する前記材料が1.0よりも大きく、例えば1.2よりも大きい、例えば1.3よりも大きい、例えば1.4よりも大きい、例えば1.45よりも大きい、例えば1.5よりも大きい、例えば1.75よりも大きい、例えば2.0よりも大きい、例えば2.5よりも大きい、例えば3.0よりも大きい、例えば3.5よりも大きい、例えば4.0よりも大きい屈折率を有することを特徴とする請求項1から33までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項35】 前記の細長要素に隣接する前記材料がシリカを基にした材料を含むことを特徴とする請求項1から34までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項36】 前記の細長要素に隣接する前記材料がポリマーを基にした材料を含むことを特徴とする請求項1から35までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項37】 前記の細長要素に隣接する任意の前記材料の屈折率よりも低い屈折率を有する該細長要素が1に等しい屈折率を有することを特徴とする前述の請求項のいずれかに記載の光ファイバ。

【請求項38】 前記の細長要素に隣接する任意の前記材料の屈折率よりも低い屈折率を有する該細長要素の少なくとも一部が、真空、液体あるいは気体を

含むことを特徴とする請求項1から37までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項39】 前記の細長要素に隣接する任意の前記材料の屈折率よりも高い屈折率を有する該細長要素が、1.3よりも大きく、例えば1.4よりも大きい、例えば1.45よりも大きい、例えば1.5よりも大きい、1.75よりも大きい、2.0よりも大きい、2.5よりも大きい、3.0よりも大きい、3.5よりも大きい、4.0よりも大きい屈折率を有することを特徴とする請求項1から38までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項40】 前記の細長要素に隣接する任意の前記材料の屈折率よりも高い屈折率を有する該細長要素は、不純物を添加したシリカを含むことを特徴とする請求項1から39までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項41】 前記コア領域が、前記ファイバの前記縦方向に延びる細長の第1の付加要素を含むことを特徴とする請求項1から40までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項42】 前記コア領域が、前記断面において、少なくとも実施的に2次元の周期的な構造の対称を破壊する全ての要素を含む最小矩形領域として規定され、該最小矩形領域が、第1の主軸および第2の主軸を規定し、該第1および第2の主軸が、第1および第2の長さをそれぞれ有し、該第1の長さが該第2の長さに等しいことを特徴とする請求項1から41までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項43】 前記コア領域が、前記断面において、少なくとも実質的に2次元の周期的な構造の対称を破壊する全ての要素を含む最小矩形領域として規定され、該最小矩形領域が、第1の主軸および第2の主軸を規定し、該第1および第2の主軸が、第1および第2の長さをそれぞれ有し、

該第1の長さが、該第2の長さの定数倍よりも大きく、該定数が1.1よりも大きい、1.2よりも大きく、1.5よりも大きい、2よりも大きい、5よりも大きい、10よりも大きい、20よりも大きい、30よりも大きい、40よりも大きい、50よりも大きいことを特徴とする請求項41に記載の光ファイバ。

【請求項44】 前記第1の付加要素がボイドであって、例えば、前記断面

における断面積が前記単位セルの断面積の少なくとも0.5倍、例えば少なくとも1倍、例えば少なくとも2倍、例えば少なくとも3、例えば少なくとも4倍、例えば少なくとも5倍、例えば少なくとも6倍、例えば少なくとも7倍、例えば少なくとも18倍、例えば少なくとも36倍、例えば少なくとも72倍である断面積を有するボイドであることを特徴とする請求項41に記載の光ファイバ。

【請求項45】 前記第1の付加要素が、真空、液体あるいは気体を保持するように適合されることを特徴とする請求項43に記載の光ファイバ。

【請求項46】 前記付加要素あるいはそれに隣接する任意の材料は、より高次の光学効果を示すドーパ剤あるいは材料であることを特徴とする請求項44又は45に記載の光ファイバ。

【請求項47】 前記コア領域が、細長の第2の付加要素を含み、前記第1および第2の付加要素が、一方の前記付加要素の中および／または一方の付加要素の周りを進行する光が他方の前記付加要素に結合できることを特徴とする請求項41から45までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項48】 前記第2の付加要素がボイドであり、前記ボイドが液体あるいは気体を保持するように適合されていることを特徴とする請求項47に記載の光ファイバ。

【請求項49】 前記ファイバが複数の前記コア領域を含むことを特徴とする請求項1から48までのいずれか1項に記載の光ファイバ。

【請求項50】 前記コア領域が、前記周期的な構造内に対称的に置かれ、該コア領域の周期が該周期的な構造の周期よりも大きいことを特徴とする請求項49に記載の光ファイバ。

【請求項51】 液体あるいは気体の少なくとも1つの特性を検知あるいは検出するセンサであって、前記センサが、

請求項1から50までのいずれか1項に記載のある長さの光ファイバであって、コア領域が少なくとも第1の付加要素を含み、該第1の付加要素が前記ファイバの縦方向に沿って延びるボイドである前記ある長さの光ファイバと、

前記液体あるいは気体を前記コア領域の前記ボイドに供給する手段と、

光を前記ボイドに導入する手段であって、該光が、前記液体あるいは気体の特

性が決定できるように該液体あるいは気体と相互に作用するように適合された導入手段と、

前記ファイバから放射された光を検出し、かつ前記液体あるいは気体の特性を決定する手段とを備えることを特徴とするセンサ。

【請求項52】 前記導入手段が前記光を前記第1の付加要素に導入するように適合されていることを特徴とする請求項51に記載のセンサ。

【請求項53】 前記コア領域が、前記ファイバの前記縦方向に延びる細長の第2の付加要素を含み、前記第1および第2の付加要素が、一方の前記付加要素に進行する光が他方の前記付加要素に結合できる距離に置かれ、かつ前記導入手段が前記光を前記第2の付加要素に導入するように構成されていることを特徴とする請求項51に記載のセンサ。

【請求項54】 前記第1の付加要素の内部面の少なくとも一部が、前記気体あるいは液体の特性に応じて変わるように適合され、かつ前記導入手段が、前記材料の変更に反応する波長の光を導入するように適合されることを特徴とする請求項51から53までのいずれか1項に記載のセンサ。

【請求項55】 光信号を増幅するファイバ増幅器であって、前記ファイバ増幅器が、

請求項1から50までのいずれか1項によるある長さの光ファイバであって、前記コア領域が前記長さの少なくとも一部に沿ってドープ剤材料を含む光ファイバと、

ポンプ放射線を前記ドープ剤材料に供給し、前記光信号を増幅するように前記ドープ剤材料をポンピングするための手段とを備えることを特徴とするファイバ増幅器。

【請求項56】 増幅された前記光信号をポンプ信号からスペクトル分離する手段をさらに含むことを特徴とする請求項55に記載のファイバ増幅器。

【請求項57】 前記ドープ剤が希土類イオンを含むことを特徴とする請求項55又は56に記載のファイバ増幅器。

【請求項58】 前記希土類イオンがエルビウムであることを特徴とする請求項57に記載のファイバ増幅器。

【請求項59】 前記ドーパ剤が写真感光材料を含むことを特徴とする請求項55から58までのいずれか1項に記載のファイバ増幅器。

【請求項60】 前記写真感光材料がゲルマニウムおよび／または重水素を含むことを特徴とする請求項69に記載のファイバ増幅器。

【請求項61】 レーザ放射線を出力するファイバレーザであって、前記ファイバレーザが、

請求項1から50までのいずれか1項に記載のある長さの光ファイバであって、コア領域が、前記長さの少なくとも一部に沿ってドーパ剤材料を含む光ファイバと、

ポンプ放射線を前記ドーパ剤材料に供給し、前記光信号を増幅するように前記ドーパ剤材料をポンピングするための手段と、

前記光信号をさらに増幅するように前記長さの前記光ファイバを通して増幅された前記光信号を繰り返して通過させるように増幅された前記光信号の少なくとも一部を選択的にフィードバックするためのフィードバック手段とを備えることを特徴とするファイバレーザ。

【請求項62】 前記ドーパ剤が希土類イオンを含むことを特徴とする請求項61に記載のファイバレーザ。

【請求項63】 前記希土類イオンがエルビウムであることを特徴とする請求項62に記載のファイバレーザ。

【請求項64】 前記ドーパ剤が写真感光材料を含むことを特徴とする請求項61から63までのいずれか1項に記載のファイバレーザ。

【請求項65】 前記写真感光材料がゲルマニウムおよび／または重水素を含むことを特徴とする請求項64に記載のファイバレーザ。

【請求項66】 光ファイバを製造するプリフォームであって、前記プリフォームは縦方向の長さおよびそれに垂直な断面を有し、該プリフォームは、

各々が前記プリフォームの前記縦方向に延びる中心軸を有する細長の一次要素であって、本質的に前記プリフォームの長さと同じである縦方向の長さを有する該細長の一次要素と、

各々が前記プリフォームの長さよりも短い長さにわたって前記プリフォーム

の前記縦方向に延びる挿入要素とを備え、

前記細長の一次要素および前記挿入要素が、非周期的な構造および少なくとも実質的に2次元の周期的な構造の両方を形成し、該非周期的な構造が、前記実質的に2次元の周期的な構造によって囲まれ、

前記周期的な構造が、前記縦方向に垂直な断面において、少なくとも1つの単位セルによって規定され、各該単位セルに対して、

第1の円が、前記単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ任意の前記一次要素のどの部分も囲まない可能な最大円形領域として規定され、前記第1の円の円周が前記挿入要素を規定することを特徴とするプリフォーム。

【請求項67】 前記挿入要素が、前記断面の少なくとも一部において、三角形構造を規定することを特徴とする請求項66に記載のプリフォーム。

【請求項68】 各前記単位セルに対して、前記第1の円の中心から前記第1の円の半径の1.5倍あるいはそれよりも小さく、例えば1.2倍あるいはそれよりも小さい、例えば1.1倍あるいはそれよりも小さい距離の範囲内にある前記細長の一次要素の中心が3つあるいはそれ以上の辺を有する第1の多角形の頂点を規定することを特徴とする請求項66又は67に記載のプリフォーム。

【請求項69】 前記第1の多角形が正多角形であることを特徴とする請求項68に記載のプリフォーム。

【請求項70】 前記第1の多角形が、6つあるいはそれ以上の辺、例えば12あるいはそれ以上、例えば18あるいはそれ以上、例えば36あるいはそれ以上の辺を有することを特徴とする請求項66又は67に記載のプリフォーム。

【請求項71】 複数の前記挿入要素が、前記プリフォームの前記縦方向に延びる軸に沿って配置されていることを特徴とする請求項66又は67に記載のプリフォーム。

【請求項72】 前記細長の一次要素の少なくとも一部が、前記断面において、三角形構造、蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定することを特徴とする請求項66から71までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項73】 前記細長の一次要素の各々の外側表面が一次領域を規定し、かつ前記挿入要素の各々の外側表面が二次領域を規定し、任意の前記一次領域



の面積が任意の前記二次領域と異なることを特徴とする請求項66から72までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項74】 各前記単位セルに対して、全前記二次領域の面積の和が、該単位セルの面積の0.09倍よりも大きく、例えば該単位セルの面積の0.1倍よりも大きい、例えば該単位セルの面積の0.15倍よりも大きい、例えば該単位セルの面積の0.2倍よりも大きい、例えば該単位セルの面積の0.25倍よりも大きい、例えば該単位セルの面積の0.3倍よりも大きい、例えば0.4倍よりも大きい、例えば0.5倍よりも大きい、例えば0.6倍よりも大きい、例えば0.7倍よりも大きい、例えば0.8倍よりも大きいことを特徴とする請求項73に記載のプリフォーム。

【請求項75】 任意の前記二次領域が、任意の前記一次領域の定数倍よりも大きく、前記定数が、1.1よりも大きく、例えば1.2よりも大きい、例えば1.3よりも大きい、例えば1.4よりも大きい、例えば1.5よりも大きい、例えば2よりも大きい、例えば4よりも大きい、例えば7よりも大きい、例えば10よりも大きい、例えば20よりも大きい、例えば50よりも大きいことを特徴とする請求項74に記載のプリフォーム。

【請求項76】 前記細長の一次要素が中空であることを特徴とする請求項66から75までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項77】 細長の前記挿入要素が固体であることを特徴とする請求項66から76までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項78】 前記の細長の要素のいずれかがシリカをベースにした材料を含むことを特徴とする請求項66から77までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項79】 前記の細長の要素のいずれかがポリマーをベースにした材料を含むことを特徴とする請求項66から78までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項80】 各々が前記プリフォームの前記縦方向に延びる中心軸を有し、かつ前記各々が前記単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ前記各々が前記単位セルの面積を超えない面積を有し、かつ前記各々が前記プリフ

ームの長さを実質的に同じである前記縦方向に長さを有し、かつ前記各々が前記細長の一次要素の任意の領域とは異なる他の領域を規定する他の細長の要素をさらに含むことを特徴とする請求項66から79までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項81】 前記他の細長の要素が固体であることを特徴とする請求項66から80までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項82】 前記他の細長の要素の少なくとも一部が、前記断面において、前記第1の円内に少なくとも部分的に含まれることを特徴とする請求項80又は81に記載のプリフォーム。

【請求項83】 前記他の細長の要素の少なくとも一部の中心が、前記断面において、前記第1の円の中心とほぼ同じであることを特徴とする請求項80から82までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項84】 コア領域をさらに含み、該コア領域が非周期的な構造として規定され、該コア領域が少なくとも実質的に2次元の周期的な構造によって囲まれていることを特徴とする請求項66から83までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項85】 前記コア領域が中空領域を含むことを特徴とする請求項84に記載のプリフォーム。

【請求項86】 前記コア領域を囲む前記少なくとも実質的に2次元の周期的な構造が少なくとも2つの周期を含むことを特徴とする請求項66から85までのいずれか1項に記載のプリフォーム。

【請求項87】 プリフォームを製造する方法であって、前記プリフォームは縦方向にある長さとそれに垂直な断面とを有し、前記方法が、

前記プリフォームのためのホルダを用意するステップであって、該ホルダが、所定の形状と、その内部面に細長い溝とを有し、前記溝が、前記プリフォームの前記長さと本質的に同じである前記縦方向の長さを有するステップと、

各々が前記プリフォームの前記縦方向に延びる中心軸を有する細長の一次要素を用意するステップであって、前記一次要素が前記プリフォームの長さと本質的に同じである前記縦方向の長さを有するステップと、

各々が前記プリフォームの前記長さよりも小さい長さにわたって前記縦方向に延びる二次要素を用意するステップと、

複数の前記二次要素を前記プリフォームの前記縦方向に沿って実質的に同じ位置に置くステップとを含むことを特徴とするプリフォームを製造する方法。

【請求項88】 縦方向を持つ導波管の構造を有する光ファイバであって、該光ファイバが、

前記縦方向に沿って延びるクラッド領域であって、該クラッド領域は、各々が前記導波管の前記縦方向に延びる中心軸を有する細長要素を含む少なくとも実質的に2次元の周期的な構造を含み、前記細長要素が該細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有するクラッド領域と、

前記縦方向に沿って延びるコア領域であって、前記コア領域が、前記縦方向に沿って延びる少なくとも1つのボイドを含み、前記少なくとも1つのボイドの断面積が前記クラッド領域内に含まれる任意の前記細長の要素の断面積の定数倍よりも大きく、前記定数が、1.1よりも大きく、例えば1.3、例えば1.5、例えば1.7、例えば2、例えば3、例えば5、例えば10、例えば20、例えば50よりも大きいコア領域とを含むことを特徴とする光ファイバ。

【請求項89】 矩形の中心が、可能な最小矩形領域の中心として規定され、前記中心が前記コア領域の外部に置かれていなく、前記矩形が前記少なくとも1つのボイドを囲み、

矩形率が前記矩形の最長側の長さを前記矩形の最短側の長さで割ったものとして規定され、

第1の軸が、可能な最長頂点として規定され、前記矩形の前記中心が前記第1の軸上に置かれ、前記第1の軸の各端部が前記少なくとも1つのボイドの1つの内部に囲まれ、

前記第2の軸が、前記第1の軸に実質的に垂直に規定され、前記第2の軸が可能な最長頂点として規定され、前記矩形の前記中心が、前記第2の軸上に置かれ、前記第1の軸の各端部が前記少なくとも1つのボイドの1つの内部に囲まれ、かつ

偏心率が、前記第1の軸の長さを前記第2の軸の長さで割ったものとして規定

されることを特徴とする請求項88に記載の光ファイバ。

【請求項90】 前記矩形が正方形であり、前記偏心率が、1よりも大きい、例えば1.1、例えば1.3、例えば1.5、例えば1.7、例えば2、例えば3、例えば5、例えば10よりも大きいことを特徴とする請求項88および89に記載の光ファイバ。

【請求項91】 前記矩形率が1よりも大きい、例えば1.1、例えば1.3、例えば1.5、例えば1.7、例えば2、例えば3、例えば5、例えば10よりも大きいことを特徴とする請求項88および89に記載の光ファイバ。

**【発明の詳細な説明】****【0001】****(発明の分野)**

本発明は、中空コアに光を閉じ込めるためにより大きい光バンドギャップを得ることができる光ファイバで使用するための新規の一連のクラッド設計に関するものである。

**【0002】****(発明の背景)**

光ファイバおよび集積光導波管 (integrated optical waveguide) は、今日光通信、センサ技術、分光学、および医療のような分野の広範囲の用途に応用されている。これらの導波管 (waveguide) は、通常全内反射 (total internal reflection) として知られている物理的效果によって電磁界 (光あるいは光子) を誘導する (guide) ことによって作動する。この基本的効果を使用することによって、導波管軸に垂直な方向への光パワーの伝搬 (あるいは損失) が減少される。

**【0003】**

しばしば (光ファイバにおける) 誘電体材料あるいは (集積光学における) 半導体から製造されるこれらの導波管内で全内反射を得るために、周囲のクラッドの屈折率 (refractive index) に比べてより高い屈折率のコアを使用する必要がある。

今日、長距離および中間距離にわたって好ましい信号伝送媒体は光ファイバであり、したがって、全内反射は、公知であり、数10年間技術開発で使用されてきた物理特性である。しかしながら、過去10年間、新しい材料の分野での開発により、全く新しい物理特性、すなわちいわゆる光バンドギャップ (photonic bandgap; PBG) 効果を利用することによって空洞 (cavity) あるいは導波管内での光のローカリゼーション (localization) あるいは電磁界の制御の可能性が開発された。

**【0004】**

PBG効果は、電磁界伝搬が所定の周波数間隔および所定の方向において禁止されるように格子寸法および適用材料が選択される空間周期格子構造 (spatial

y priodic lattice structure ) を提供することによって導入することができる。これらのPBG材料は、科学文献およびいくつかの特許（例えば、米国特許第5386215号、米国特許第5335240号、米国特許第5440421号、米国特許第5600483号、米国特許第5172267号、米国特許第5559825号を参照）において1次元、2次元、および3次元の事例に記載されている。

#### 【0005】

このような周期的な誘電体構造（dielectric structure）を利用する特定の種類の部品は、周期的な変動が導波管軸に垂直な方向で生じる光ファイバ（あるいは導波管）であり、実はこの構造は導波管軸に沿って不変である。

近年、特に英国のBath大学からの研究者達（例えば、Birks外の「エレクトロニクスレターズ（Electronics Letters）」第31巻（22）、1941ページ、1995年10月）は、シリカバックグラウンド（silica-background）材料の細い、平行な空気充填ボイド／ホール（air-filled voids/holes）によって囲まれたコア（core）を有し、ファイバのクラッド領域（cladding region）内に周期的な構造に空気充填ボイドを組織的に構成することによって実現されるこのような光ファイバを提示した。

#### 【0006】

上記で引用したバーク外の文献は、光バンドギャップ誘導ファイバ（photo bandgap guiding fiber）を開示しているけれども、その時以来、クラッド構造が光バンドギャップ効果を示す要件は光を誘導できるこれらのいわゆる微細構造ファイバ（micro-structured fiber）を必要としないということが分かった（例えば、Knight外の論文「Journal of the Optical Society of America, A., Vol.15(3), p748, March 1998」を参照）。これに対する理由は、クラッド構造の有効屈折率よりも高い屈折率を持つコア領域を有する微細構造ファイバは全内反射によって光を誘導できるということである。これにより、エアボイドの周期的な配置は、高屈折率コア微細構造ファイバの動作に対する要件ではないことも分かった（例えば米国特許第5,802,236号参照）。

#### 【0007】

示された高屈折率コア微細構造ファイバの全てが光バンドギャップ効果に基づいた動作をしないことに注目することは重要である。しかし、単にクラッド（米国特許第5,802,236号のコアとクラッド指数（cladding indices）の定義参照）に比べてコア領域の屈折率がより高いことにより、全ての高屈折率のコアファイバは全内反射により誘導される（屈折率誘導（index guiding）としても公知である）基本モード（fundamental mode）を有する。

#### 【0008】

高屈折率コアファイバとは対照的に、低屈折率ファイバ（すなわち、クラッドよりも低い屈折率を有するコア領域を有するファイバ）は、全内反射によってコア領域に漏れ無しで光を誘導することはできない。しかしながら、周期的なクラッド構造を正確に設計することによって、このクラッド構造は、上記に引用されたBirks外の文献に記載されているように、光バンドギャップ効果を示すことができる。

#### 【0009】

クラッド構造を正確に設計することは、サイズ、寸法および形態（morphology）に対するボイドの周期的配置を最適にすることを必要とする。光バンドギャップ効果を示しているクラッド構造は、所定の波長および入射角の光を反射することができる。これは、クラッド構造が、光が光バンドギャップ（PBG）内にあるという条件を満たす光をクラッド構造によって囲まれた空間領域に閉じ込めることができることを意味する。これは、まさに空間領域がクラッド構造よりも低い屈折率を効率的に有する場合である。これは、PBG誘導光ファイバおよび他のPBG導波管の動作原理である（例えば、Barkou外の論文「Optics Letters, Vol.24(1), p.46, January 1999」を参照）。

#### 【0010】

導波（waveguidance）を生じる根本的に異なる物理機構により、微細構造ファイバは（少なくとも）2つのグループに分類される。すなわち、PBGファイバと呼ぶ（バンドギャップファイバあるいは低屈折率コアファイバとも呼ぶ）光バンドギャップ効果で作動する微細構造ファイバおよび高屈折率コアファイバ（high-index core fiber）あるいは屈折率誘導ファイバ（index-guiding fiber）

と呼ばれる全内反射によって作動する微細構造ファイバである。

#### 【0011】

光バンドギャップ効果による導波は、光ファイバおよび他の種類の導波管の非常に新しい設計を可能にするので、将来非常に興味がある。特に、光ファイバの場合、コアはクラッドよりも高い屈折率を有する必要がない。このような低屈折率コア光ファイバ（例えば、中空コアファイバ）は、多数の用途で、例えば、センサ系であるいは通信システムの超低損失伝送ファイバとして使用するために利用することができる。

#### 【0012】

最近、最初の光バンドギャップ誘導光ファイバが実証された（Knight 外の論文「Science, Vol.282(5393), p.1476, November 1998」を参照）。このファイバの設計は、クラッドのシリカバックグラウンド材料内のエアースポイド（air void）の蜂の巣（Honeycomb）配置およびコアに形成された単一の周期性破壊低屈折率領域（periodicity-breaking low-index region）に基づいたものである。例えば、三角形構造に比べて蜂の巣ベースのクラッド構造を使用する長所は、クラッド構造がより小さい（従ってより現実的である）エアースポイドサイズに対して光バンドギャップ効果を示すということである。

#### 【0013】

Birks 外によって示された構造のPBGは、三角形クラッド構造のために、PBG効果を使用して電磁放射を誘導することに対して最適にされないことが欠点である。

最近実証された蜂の巣ベースのPBGファイバにおける光はシリカ内にほとんど完全に分配されることが更なる欠点である。

#### 【0014】

最近実証された蜂の巣ベースのPBGファイバのクラッド構造は中空コア内部に光を誘導することに対して最適にされないことが更にもう一つの欠点である。

最近実証されたPBGファイバのクラッド構造内のエアースポイドの蜂の巣配置は大きなポイド充填率（void filling fraction）を得ることに対して最適にされないことが更にもう一つの欠点である。



## 【0015】

六角形ロッドおよび六角形ガラスチューブ（中心ボイドを有する）の注意深く密にパッケージされた（close-packed）積み重ねあるいは円形ロッドおよび細い円形チューブの直接積み重ねのいずれかが必要であるということは周期的な誘電体クラッド領域を有する現光ファイバの実現の問題あるいは欠点であり得る。これらのチューブおよびロッドは、プリフォーム（preform）で密にパッケージされた三角形構造に配置され、そのプリフォームのあとで光ファイバに引き込まれる、国際文献のレポートによればこれらのファイバは確かに興味ある、新しい光学特性を示すけれども、欠点の1つは、チューブおよびロッドを密にパッケージすることが大きなボイド充填率を有するファイバを実現することに対して最適にされないということであった。

## 【0016】

当業者に公知であるように、大きなボイド充填率は、光が実質的に中空コア内に誘導されるPBGファイバを得るために必要である。

したがって、六角形ガラスチューブ（中心ボイドを有する）の現在の積み重ねと、密にパッケージされた構造の細い円形チューブの直接積み重ねのどちらも大きなボイド充填率を有する光ファイバを製造することに対して最適にされないことが更なる欠点である。

## 【0017】

米国特許第5,802,236号は、コアおよびクラッド領域を有する微細加工（micro-fabricated）光ファイバを開示し、それにおいて、クラッド領域はファイバの方向に細長く延長された多数の間隔をあけられたクラッド構造（cladding features）を含む。クラッド領域の有効屈折率はコア領域の有効屈折率よりも小さい。さらに、クラッドの細長（elongated）構造は非周期的な構造に配置されている。

## 【0018】

高屈折率コア領域のために導波特性がコア領域に誘導された電磁放射の従来の全内反射に基づいていることは、米国特許第5,802,236号に開示された微細加工光ファイバの欠点である。

非周期的なクラッド構造が光バンドギャップ効果を示すことができないことは米国特許第5,802,236号の更なる欠点である。したがって、米国特許第5,802,236号に開示された非周期的なファイバは従来の全内反射によって光を誘導できるのみである。

#### 【0019】

これらのファイバが常に全内反射により誘導される基本モードを維持することが全ての高屈折率コアファイバに対する更なる欠点である。このために、当然、光フィールド (optical field) を低屈折率の領域内 (例えば、真空中、液体あるいは気体充填チャネル) の単一の周知のモード分布 (mode-distribution) に閉じ込めることができることが特に関心事であり得る光センサおよび電気通信の低損失伝送リンクのような分野の用途に対して、現在公知の高屈折率コアファイバを直接使用できない結果となる。

#### 【0020】

WO99/00685号は、好ましくは三角形の周期的な構造を有するクラッドを含む大きなコアの光結晶ファイバ (photonic crystal fiber; PCF) を開示している。コア領域は、少なくとも  $5\mu\text{m}$  の直径を有する高屈折率か低屈折率の領域のいずれであってもよい。好ましい実施例では、ファイバは、全内反射によって誘導し、不純物が添加されない純粋のシリカから作られた固体コア領域を有し、直径が  $50\mu\text{m}$  ほどの大きさであってもよい。このような直径の場合、ファイバは、高電力を伝達できると同時に十分小さいエアープォイドに対して単一モード動作を維持する (例えば、Knight 外の論文「Electronics Letters Vol.34(13), p.1347, June 1998」を参照)。単一モード動作に対する理由は、小さいエアープォイドを有するシリカ材料によって囲まれた大きな固体シリカコアを有する好ましい実施例のファイバは有効コア屈折率 (effective refractive core index) (シリカに等しい) と有効クラッド屈折率 (effective cladding index) との間に非常にわずかな差異があるということである。それによって、このファイバ構成のためのより高い次数 (order) のモードは避けることができる。高屈折率コアを有する大きなコアファイバは、従来の全内反射によって作動するので、光を中空コアに閉じ込めることができないことに注目することはまた重要

である。

#### 【0021】

WO99/00685に開示された三角形クラッド構造は可視あるいは近赤外線 of 電磁放射をファイバの低屈折率コア領域内に有効的に閉じ込めるような十分なPBG効果を提供するように最適にされないことが欠点である。

大きなシリカコアを有するファイバに対する単一モード動作を得るために非常に小さいエアークラッドしかクラッド内に許容されないことがWO99/00685に開示された構造の更なる欠点である。それによって、ファイバは、コア屈折率と有効クラッド屈折率との間の差異が非常にわずかになり誘導モード (guided mode) がコア領域に強力に閉じ込められないという否定的な結果を有することになる。したがって、このファイバは、小さい曲げおよび大きな曲げの両方に非常に敏感で、例えば、電気通信のためのファイバの通常の運転の下で損失を受けるであろう。したがって、WO99/00685号に開示されたファイバは、実際の環境において高い光パワー (optical power) を漏れなしで伝送することに対して最適化されない。

#### 【0022】

本発明の目的は、1つあるいはそれ以上のコア領域に沿った導波がPBG効果の利用によって得られる新しい種類の光導波管を提供することにある。

本発明の更なる目的は、空気あるいは真空から入射する光を反射する完全なPBGを提供することができる最適化された2次元格子構造を提供することにある。このような構造は、光が閉じ込められ、それによって中空コア領域に導かれる光ファイバのクラッド構造として使用できる。

#### 【0023】

本発明のもう一つの目的は、超低損失PBG導波構造に対する設計を提供することである。

本発明のもう一つの目的は、製造が容易なPBG構造を提供することにある。

本発明のもう一つの目的は、クラッドおよびコア構造の設計の高い柔軟性を可能にするのと同時に大きな空気充填率を有する光結晶ファイバの容易な製造を可能にする新しい製造技術を提供することにある。

## 【0024】

## (発明の概要)

光ファイバ（ならびにその他の種類の導波管および部品）においてPBG効果を利用するために、広いバンドギャップならびにいわゆるエアライン（air line）の下に延びるバンドギャップを示すクラッド構造を実現できることが極めて重要である。バンドギャップがエアラインの下に延びることは、クラッド構造が空気（あるいは真空）から入射する光を反射できることを意味する。

## 【0025】

当業者に公知であるように、これらの目的を得るための2つの主要因は、大きなボイド充填率を有する構造およびこの構造そのものの幾何学的形状（geometry）の適切な設計の実現である。本発明者達は、現在可能であるものよりも大きなボイド充填率を有するファイバの製造を可能にするばかりでなく、最終的なファイバの構造（morphology）を設計するための柔軟性も非常に増加させる新しい製造技術を実現した。さらに、本発明者達は、クラッド構造が与えられた材料内に2次元の周期的な低屈折率領域として形成される光ファイバの光バンドギャップのサイズを変更する（modify）方法を実現した。このような構造において、周期的な構造を形成する低屈折率領域によって分離される多数の高屈折率領域が規定される場合、これらの高屈折率領域間の分離、それらのそれぞれの屈折率、あるいは両方のいずれかが増加されるならば、光バンドギャップの性能は向上される。高屈折率領域は低屈折率領域間の“ブリッジ（bridging）”領域を介して結合し、それらの分離は多数の領域で得られる。

## 【0026】

格子間ボイド（interstitial voids）が光結晶ファイバの三角形クラッド構造に導入される場合、光バンドギャップのサイズを減少させることができることは、国際文献（Broeng他の論文「Optics Communications, Vol.156(4-6), p.240, November 1998」）から公知である。この理由のために、三角形クラッド構造が使用される場合、格子間ボイドを取り除く傾向があるファイバ設計を行うことは最も妥当であるように思える。

## 【0027】

しかしながら、本発明者達は、どこに格子間ボイドを配置するかは重要であり、格子間ボイドがすぐ隣の自然の位置（従来の製造技術の結果としての位置）とは異なる場所に置かれた場合、格子間ボイドは確かに好都合であるかもしれないと分かった。下記の説明で示されるように、主要な点は、格子間ボイドが周期的なクラッド構造の高屈折率領域をさらに分離できるように格子間ボイドを配置することにある。本発明は、格子間ボイドの位置決めのための多くの好ましい実施例を含むだけでなく、可能な格子間ボイドの所望の位置決めに有する微細構造ファイバの製造を行う新しい製造技術も含む。

#### 【0028】

下記において、当然、周期的な構造は、このような構造の解析を簡単にする最も広く使用されている方法である基本単位セル（primitive unit cell）によって規定される。単位セルの多くのサイズが存在するが、しかし可能な最少面積（あるいは3Dの周期的な構造の場合は体積）を有する単位セルと規定され、そして平行移動（translation）だけでこの構造を発生し得る基本単位セルは1つのサイズだけ存在することに注目すべきである。当然、所与の周期的な構造は複数の基本単位セルを有してもよい。

#### 【0029】

下記において、この構造は基本単位セルと同一である単位セルによって規定される。

ここで、“実質的にラインに沿って置かれた”は、2つの隣接する一次要素間の接続ライン上に直接中心を置かれた要素を有することが望まれるが、製造方法がこれをしばしば変更することを意味する。従来技術では、円形エアボイドの位置（低屈折率領域）は、この実質的な位置決めのしるしである2つの隣接一次要素間の中心間の距離の10%以内に制御できることが分かる。

#### 【0030】

さらに、本文脈において、一次要素の屈折率は、それに隣接する任意の材料の屈折率よりも低くなく、この実際の屈折率の変化は周期的な構造をもたらす屈折率の変化であることを意味する。このステップは、一次要素の周辺の周りの隣接領域（immediate area）外の屈折率の変化に左右されない。当然、

このステップは、全ての一次要素に対して異なってもよいが、通常一次要素に隣接する材料は構造中ずっと同じであり、一次要素のそれと同様であり、それによってこのステップは一次要素の周りの全ての周辺で同じである。

#### 【0031】

第1の態様では、本発明は、縦方向を持つ導波管構造を有する光ファイバに関し、この光ファイバは、

縦方向に沿って延びるコア領域と、

縦方向に沿って延びるクラッド領域とを備え、このクラッド領域が、各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する細長要素を含む少なくとも実質的に2次元の周期的な構造を含み、細長要素が、その細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有し、

周期的な構造が、縦方向に垂直な断面において、少なくとも1つの単位セルによって規定され、各単位セルに対して、

2つの隣接する細長要素の中心軸間のどの距離も $2\mu\text{m}$ を超えないで、かつ

与えられた単位セル内に含まれる全ての要素の全面積の和の面積が、この単位セルの面積の0.15倍よりも大きいものである。

#### 【0032】

光ファイバが作動することを意図する波長に応じて、2つの隣接する細長要素の中心軸間の任意の距離は、さらに $1.9\mu\text{m}$ よりも小さくなりさえすれば、例えば $1.8\mu\text{m}$ よりも小さく、例えば $1.6\mu\text{m}$ よりも小さく、例えば $1.4\mu\text{m}$ よりも小さく、例えば $1.2\mu\text{m}$ よりも小さく、例えば $1.0\mu\text{m}$ よりも小さく、例えば $0.8\mu\text{m}$ よりも小さく、例えば $0.6\mu\text{m}$ よりも小さくてもよい。

#### 【0033】

与えられた単位セルに対しては、単位セル内の全要素の全面積の和は、この単位セルの面積の定数倍よりも大きいことが望ましく、この定数は0.2よりも大きく、例えば0.25よりも大きい、例えば0.3よりも大きい、例えば0.4よりも大きい、例えば0.5よりも大きい、例えば0.6よりも大きい、例えば0.7よりも大きい、例えば0.8よりも大きい。

#### 【0034】

各単位セルに対して、第1の円は、単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ任意の細長要素のどの部分も囲まない可能な最大円領域として規定され、かつその部分が、上記第1の円の中心からその第1の円の半径の1.5倍あるいはそれよりも小さい、例えば1.2倍あるいはそれよりも小さいか、例えば1.1倍あるいはそれよりも小さい距離の範囲内にあるこれらの細長要素の中心は3つあるいはそれ以上の辺を有する多角形（polygon）の頂点を規定する。この多角形は、正三角形、正長方形、正方形、あるいは正六角形であってもよい。

【0035】

本発明による光ファイバは、さらに各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する他の細長要素を含む。

これらの他の細長要素は、その細長の二次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも高い屈折率を有し、それらの各々が単位セル外部に置かれていない中心を有し、各々が単位セルの面積を超えない面積を有する。

【0036】

上記の他の細長要素の一部は、断面において、三角形構造、蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造（kagome' structure）を規定する。

本文脈において、蜂の巣構造は、その全ての辺が他の六角形に共通である六角形として規定される。六角形および六角形の辺の長さに対応する辺の長さを有する正三角形として規定される構造はカゴメ構造と言われ、その各辺が三角形に共通である六角形が存在する。

【0037】

上記の他の細長要素は、断面において、第1の円内に少なくとも部分的に含まれる。好ましくは、少なくともこの他の細長要素の部分の中心は第1の円の中心と実質的に一致する。

第2の態様では、本発明は、縦方向を持つ導波管構造を有する光ファイバに関し、この光ファイバは、

縦方向に沿って延びるコア領域と、

縦方向に沿って延びるクラッド領域とを備え、少なくとも実質的に2次元の周期的な構造を含む上記クラッド領域が、

各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する細長の一次要素であって、この一次要素がこの一次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有する一次要素と、

各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する細長の二次要素であって、この二次要素がこの二次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有する二次要素とを含み、

任意の一次要素のいかなる面積も任意の二次要素のいかなる面積よりも大きく

、  
周期的な構造が、前記の縦方向に垂直な断面において、少なくとも1つの単位セルによって規定され、各単位セルに対して、

与えられた単位セル内に含まれる二次要素の面積の和の面積が、この単位セルの面積の0.09倍よりも大きいものである。

#### 【0038】

任意の一次要素のいかなる面積も任意の二次要素のいかなる面積の定数倍よりも大きく、この定数は、1.1よりも大きく、例えば1.2よりも大きい、例えば1.3よりも大きい、例えば1.4よりも大きい、例えば1.5よりも大きい、例えば2.0よりも大きい、例えば5.0よりも大きい、例えば10よりも大きい、例えば15よりも大きい、例えば20よりも大きい、例えば50よりも大きい。

#### 【0039】

大きな空気充填係数 (air filling factor) を提供するために、単位セル内の二次要素の全面積の和の比率は、0.1倍よりも大きく、例えば0.15よりも大きい、例えば0.2よりも大きい、例えば0.25よりも大きい、例えば0.3よりも大きい、例えば0.4よりも大きい、例えば0.5よりも大きい、例えば0.6よりも大きい。

#### 【0040】

各単位セルに対して、第1の円は、その単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ任意の細長の一次要素のどの部分も囲まない可能な最大円面積として規定され、上記第1の円の中心から第1の円の半径の1.5倍あるいはそれよ



りも小さく、例えば1.2倍あるいはそれよりも小さい、例えば1.1倍あるいはそれよりも小さい距離の範囲内にあるこれらの細長の一次要素の中心は3つあるいはそれ以上の辺を有する第1の多角形の頂点を規定する。

#### 【0041】

第1の多角形は正三角形である。少なくとも細長の一次要素の部分は、断面において、三角形構造を規定する。

好ましくは、細長の二次要素の中心は何れも、断面において、第1の円の中心と決して一致しない。少なくとも細長の二次要素の部分の中心は、断面において、2つの隣接する細長の一次要素の中心間を接続するラインに実質的に沿って置かれている。

#### 【0042】

本発明による光ファイバは、各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する他の細長要素をさらに含み、この他の細長要素は、この他の細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも高い屈折率を有し、かつ各々が単位セルの外部に置かれていない中心を有し、各々が単位セルの面積を超えない面積を有する。

少なくとも上記の他の細長い要素の部分はその断面において、三角形構造、蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定する。蜂の巣およびカゴメ構造に対する定義は前記に示したとおりである。

#### 【0043】

上記の他の細長要素は第1の円内に少なくとも部分的に含まれる。好ましくは、少なくともこの他の細長要素の部分の中心は第1の円の中心と実質的に一致する。

与えられた単位セルに対して、単位セル内の一次要素の全面積の和は、この単位セルの面積の定数倍よりも大きく、この定数は0.1よりも大きく、例えば0.15よりも大きい、例えば0.2よりも大きい、例えば0.25よりも大きい、例えば0.3よりも大きい、例えば0.4よりも大きい、例えば0.5よりも大きい、例えば0.6よりも大きい、例えば0.7よりも大きい、例えば0.8よりも大きい。

#### 【0044】

第3の態様において、本発明は、縦方向を有する導波管構造の光ファイバに関し、この光ファイバは、

縦方向に沿って延びるコア領域と、

縦方向に沿って延びるクラッド領域とを備え、少なくとも実質的に2次元の周期的な構造を含む上記クラッド領域は、

各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する細長の一次要素であって、細長の一次要素はこの一次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有する細長の一次要素と、

各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する細長の二次要素であって、この二次要素がこの二次要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有する二次要素とを含み、

任意の一次要素のいかなる面積も任意の二次要素のいかなる面積よりも大きく、かつ縦方向に垂直な断面において、

上記の細長の一次要素は三角形構造を規定し、

周期的な構造は、上記の断面において、少なくとも1つの単位セルによって規定され、各単位セルに対して、

第1の円が、その単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ任意の細長の一次要素のどの部分も囲まない可能な最大円面積として規定され、かつ

前記の細長の二次要素のいずれの中心も、前記の断面において、前記の第1の円の中心と一致しない。

#### 【0045】

任意の一次要素のいかなる面積も任意の二次要素の任意の面積の定数倍よりも大きく、この定数は、1. 1よりも大きく、例えば1. 2よりも大きい、例えば1. 3よりも大きい、例えば1. 4よりも大きい、例えば1. 5よりも大きい、例えば2. 0よりも大きい、例えば5. 0よりも大きい、例えば10よりも大きい、例えば20よりも大きい、例えば50よりも大きい、例えば100よりも大きい、例えば200よりも大きい、例えば500よりも大きい。

#### 【0046】

各単位セルに対して、その単位セル内の前記の二次要素の全面積の和は、この

単位セルの面積の0.005倍よりも大きく、例えばこの単位セルの面積の0.01倍よりも大きい、例えば0.05倍よりも大きい、例えば0.1倍よりも大きい、例えば0.15倍よりも大きい、例えば0.2倍よりも大きい、例えば0.25倍よりも大きい、例えば0.3倍よりも大きい、例えば0.4倍よりも大きい、例えば上記の単位セルの面積の0.5倍よりも大きい。

【0047】

少なくとも細長の二次要素の部分は、その断面において、三角形構造、蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定する。少なくとも細長の二次要素の部分は、その断面において、2つの隣接する細長の一次要素の中心間を接続するラインに実質的に沿って置かれたそれらの中心を有する。

第3の態様において、このファイバは、各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する他の細長要素を含み、この他の細長要素は、この他の細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも高い屈折率を有し、その各々が単位セル外に置かれていない中心を有し、かつ単位セルの面積を超えない面積を有する。

【0048】

少なくとも上記の他の細長要素の一部は、その断面において、三角形構造、蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定する。

上記の他の細長要素は、その断面において、第1の円内に少なくとも部分的に含まれている。好ましくは、少なくともこの他の細長要素の部分の中心は、その断面において、第1の円の中心と実質的に一致する。

【0049】

与えられた単位セルに対して、単位セル内の一次要素の全面積の和は、この単位セルの面積のある定数倍よりも大きく、この定数は0.1よりも大きく、例えば0.15よりも大きい、例えば0.2よりも大きい、例えば0.25よりも大きい、例えば0.3よりも大きい、例えば0.4よりも大きい、例えば0.5よりも大きい、例えば0.6よりも大きい、例えば0.7よりも大きい、例えば0.8よりも大きい。

【0050】

本発明の第3の態様によれば、細長要素に隣接する材料は、1.0よりも大き

く、例えば1.2よりも大きい、例えば1.3よりも大きい、例えば1.4よりも大きい、例えば1.45よりも大きい、例えば1.5よりも大きい、例えば1.75よりも大きい、例えば2.0よりも大きい、例えば2.5よりも大きい、例えば3.0よりも大きい、例えば3.5よりも大きい、例えば4.0よりも大きい屈折率を有する。

#### 【0051】

上記の細長要素に隣接する上記の材料はシリカを基にした (silica-based) 材料を含んでもよい。その代わりに、あるいはさらに追加的に、この細長要素に隣接する材料はポリマーを基にした材料を含んでもよい。

上記の細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有するこれらの細長要素は1に等しい屈折率を有する。好ましくは、これらの細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有するこれらの細長要素は、真空、液体あるいは気体を含む。

#### 【0052】

上記の細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも高い屈折率を有するこれらの細長要素は、1.3よりも大きい屈折率を有し、例えば1.4よりも大きい、例えば1.45よりも大きい、例えば1.5よりも大きい、1.75よりも大きい、2.0よりも大きい、2.5よりも大きい、3.0よりも大きい、3.5よりも大きい、4.0よりも大きい屈折率を有する。

#### 【0053】

上記の細長要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも高い屈折率を有するこれらの細長要素は、不純物を添加したシリカ (doped silica) を含む。

本発明の態様は、特定のクラッド構造に関するもので、コア領域に関する制限は含まない。

実際、本発明は、1つあるいはそれ以上のコアあるいは任意の種類のコア領域と組み合わせて任意の型式の光ファイバで使用するための上記の特定のクラッド領域に関するものと考えべきである。

#### 【0054】

通常、周期的な誘電体構造に関しては、コアは、構造の周期性を壊す構造のも

のとして考えられる。光バンドギャップ構造は光伝送 (light transmission) を不可能にするように設計され、したがって、周期性の変更 (altering) は、コアおよびその近接した周辺においてのみ光伝送を可能にする。

多数の異なる方法がコアを規定するために存在する。1つの方法は、周期的な構造の1つあるいはそれ以上の要素を異なる屈折率、断面あるいは形状を有する他の要素と取り換えることである。もう1つの方法は、コアが1つあるいはそれ以上の要素のみが存在しない周期的な構造を有することである。もう1つの方法は、コアも全周期的な構造 (full periodic structure) を有するがしかし、この構造はクラッドの周期的な構造とは異なることである。

#### 【0055】

好ましくは、コア領域は、ファイバの縦方向に延びる第1の細長の付加要素を含むであろう。

コア領域は、少なくとも実質的に2次元の周期的な構造の対称性を破壊する全ての要素を含む最小矩形領域として規定され、その最小矩形領域は、第1の主軸および第2の主軸を規定し、この第1および第2の主軸は第1および第2の長さをそれぞれ有し、この第1の長さは第2の長さに等しいものであってもよい。

#### 【0056】

それとは別に、コア領域は、少なくとも実質的に2次元の周期的な構造の対称性を壊す全ての要素を含む最小矩形領域として規定され、この最小矩形領域は、第1の主軸および第2の主軸を規定し、その第1および第2の主軸は第1および第2の長さをそれぞれ有し、その第1の長さは、第2の長さのある定数倍よりも大きく、この定数は、1より大きく、例えば1.2よりも大きい、例えば1.5よりも大きい、例えば2よりも大きい、例えば5よりも大きい、例えば10よりも大きい、例えば20よりも大きい、例えば30よりも大きい、例えば40よりも大きい、例えば50よりも大きい。

#### 【0057】

特に好ましい第1の付加要素は、空気、液体あるいは気体によって構成され、ファイバの材料中のボイドとして、例えば、その断面における断面積が単位セルの断面積の少なくとも1/2倍、例えば単位セルの断面積の少なくとも1倍、例

えば少なくとも2倍、例えば少なくとも3倍、少なくとも4倍、例えば少なくとも5倍、例えば少なくとも6倍、例えば少なくとも7倍、例えば少なくとも18倍、例えば少なくとも36倍、例えば少なくとも72倍である断面積を有するポイドとして規定される。

#### 【0058】

この場合、光は、低減された伝搬損失、改良された分散特性 (dispersion properties) および低減された非線形性のために電気通信産業で使用されるファイバおよび、例えば、ガスあるいは液体が光とガスあるいは液体との間の最適なオーバーラップを得るために中空コア内に備えることができるセンサ用途で 사용되는ファイバの両方に対して多数の利点を提供する中空コア (hollow core) (例えば、真空を含む) 内にほとんど完全に伝搬することができる。

#### 【0059】

多数の異なる用途では、上記の付加要素あるいはそれに隣接する任意の材料は、望ましくは、より高次の光学効果 (higher order optical effects) を示すドープ剤 (dopant) あるいは材料を含んでもよい。

通信目的のためは、より高次の効果は、例えばソリトン通信 (soliton communication) のために使用されてもよい。

#### 【0060】

ファイバレーザあるいはファイバ増幅器のための用途に対して、ドープ剤は、ポンプ放射線 (pump radiation) を受信し、コア領域に進行する放射線を増幅するように適合される例えば希土類ドープ剤 (rare earth dopant) であってもよい。

それとは別に、ドープ剤は、感光ドープ剤、例えばゲルマニウムのようなもの (例えば、イッテルビウム (Ytterbium) のような他の材料をロードしたもの) であってもよい。この場合、ドープ剤は、例えば、屈折率回折格子 (refractive-index grating) をファイバあるいはコア領域に光学的に書くために使用されてもよい。

#### 【0061】

センサの用途に対しては、そのドープ剤はガスや液体の特性に反応しやすく、

その反応がコア領域に侵入する光によって光学的に検出できる材料であってもよい。

多数の用途において、コア領域は第2の細長の付加要素を含み、その第1および第2の付加要素は、一方の付加要素に進行する光が他方の付加要素に結合することができる距離に置かれていることが好ましい。

#### 【0062】

1つの用途では、一つの細長要素は、あまりにも濁っているので光が進行できないかもしれない液体あるいは気体を保持するボイドであってもよい。この場合、光は、要素間の限られた距離のために液体あるいは気体となお結合している間に他方の要素中を進行してもよい。

この場合、一方の付加要素あるいは両方の付加要素にだけ、あるいはクラッド構造のボイドのような全ての細長ボイドにさえも液体あるいは気体を進行させるように選択してもよい。

#### 【0063】

また、その間で光が結合してもよい2つの要素を備えることによって、例えば光ファイバカプラーのような多数の光学装置を備えることができる。コア要素あるいはコア領域間の光学結合は、1つあるいはそれ以上の規定の波長で所定の結合を有するように設計されてもよく、これによりさらに多数の光学素子が可能になる。

#### 【0064】

他の可能性は、ファイバ構造の中に極く薄い金属シリンダのような細長い電気導体を含むことにある。それによって、光学材料のポーリング (poling) のような性能は実現できる。これは、例えば、シリカあるいはポリマー構造の広範囲の材料に関連し得る。これらの種類の付加要素は、最終的には、スイッチング素子のような能動的に制御される光導波管部品が実現することになり得る。

#### 【0065】

上記に示したように、第2の付加要素が低屈折率シリンダである場合も特定の利点を得られる。

実際、本ファイバの周期的構造により、このファイバは、複数のコア領域を含

むように容易に製造できる。

これらのコア領域は、1つあるいはそれ以上のコア領域に結合できる1つのコアに進行する光に対して十分近接して備えられてもよい。

#### 【0066】

それとは別に、コア領域は、単一ファイバ中に多数の別々の導波管を備えるために間隔をあけて置かれてもよい。実際、導波管は、異なる波長あるいは波長状況 (wavelength regime) に対してそれらのそれぞれの光バンドギャップ構造が異なっていて、例えば最適化されるようにするために十分間隔をあけてもよい。

好ましくは、コア領域は周期的な構造 (periodic structure) 内に対称的に置かれ、コア領域の周期は上記の周期的な構造の周期よりも大きい。

#### 【0067】

当然、この種類のファイバは、ファイバが今日既に使用されている多数の用途のために使用されてもよい。

第4の態様では、本発明は、液体あるいは気体の少なくとも1つの特性を検知あるいは検出するためのセンサに関し、このセンサは、

本発明によるある長さの光ファイバであって、コア領域が、少なくとも第1の付加要素を含み、この第1の要素が上記ファイバの縦方向に沿って延びるボイドである光ファイバと、

液体あるいは気体を上記のコア領域のボイドに供給する手段と、

光を上記のコア領域に導入する手段であって、光が、液体あるいは気体の特性が決定されるようにその気体あるいは液体と相互作用するように適合された導入手段と、

ファイバから放射された光を検出し、かつ液体あるいは気体の特性を決定するための手段とを備えている。

#### 【0068】

現在、この特性は、煙検出器として使用されるためのような、気体あるいは液体中の特殊な作用物 (agent) あるいは材料の吸収作用 (absorption)、吸光度 (absorbance)、存在、あるいは光検知方法によって検知される任意の他の特性であってもよい。



ガスあるいは液体が光の波長で十分低い吸収作用を有する場合は、上記の導入手段は、光を第1の付加要素に導入するように適合されてもよい。この場合、最適オーバーラップは、光と液体あるいは気体との間に存在する。

【0069】

それとは別に、コア領域は、ファイバの縦方向に延びる第2の細長要素を含んでもよく、上記の第1および第2の付加要素は、一方の付加要素に進行する光が他方の付加要素に結合できる距離に置かれ、かつ上記の導入手段は光を第2の付加要素に導入するように適合される。この場合、検知は、第2の要素から第1の要素に延びる光を介して行われる。

【0070】

別の種類のセンサでは、この特性は光によって直接検知されなくてもよい。この場合、適当な材料をこの材料の反応が光学的に検知され得る特性にさらす(expose)ことが望まれよう。したがって、この場合、少なくとも第1の付加要素の内部面の部分は、気体あるいは液体の特性に応じて変化するように適合される材料の層を含んでもよく、かつ前記の導入手段は材料の変更に反応する波長の光を導入するように適合される。

【0071】

当然、センサは、気体あるいは液体をファイバに供給するための、例えば、気体あるいは液体をその中に繰り返し供給する手段、例えばセンサが煙検出器として使用される場合のガスポンプを備えている。

第5の態様において、本発明は、光信号を増幅するファイバ増幅器(fiber amplifier)に関し、このファイバ増幅器は、

本発明によるある長さの光ファイバであって、前記のコア領域が、少なくともその長さの一部分に沿ってドープ剤材料を含む光ファイバと、

ポンプ放射線(pump radiation)をドープ剤材料に供給し、光信号を増幅するようにドープ剤材料をポンピング(pumping)するための手段とを備えている。

【0072】

通常、ファイバ増幅器は、増幅領域の外部でファイバに進行するポンプ放射線を有しないようにするために増幅された光信号をポンプ信号(pump signal)か

らスペクトル分離する手段をさらに含むであろう。

特に通信目的のためには、ドーパ剤は、希土類イオン、例えばエルビウム、イッテルビウム、プラセオジミウム (Praseodymium)、ネオジム等を含む。

【0073】

ファイバあるいはコア領域に回折格子あるいは他の構造を光学的に書くことが望まれる場合のように、あるいは単にコア領域の屈折率を修正するためのような他の目的のためには、ドーパ剤は、写真感光材料、例えばゲルマニウム、セシウム、および（あるいは）感光度を高めるコドーパント (co-dopant)（例えば、水素あるいは重水素 (deuterium)）を含んでもよい。

【0074】

第7の態様において、本発明は、レーザ放射線の発生のためのファイバレーザ (fiber laser) に関し、このファイバレーザは、

前述の特許請求の範囲のいずれか1項に記載のある長さの光ファイバであって、コア領域は、少なくともその長さの部分に沿ってドーパ剤材料を含む光ファイバと、

ポンプ放射線をドーパ剤材料に供給して、光信号を増幅するようにドーパ剤をポンピングするための手段と、

その光信号を更に増幅するためにその長さの光ファイバを通して増幅された光信号を繰り返して通過させるように、少なくともその増幅された光信号の一部分を選択的にフィードバックするためのフィードバック手段とを備えている。

【0075】

特に、通信目的のためには、ドーパ剤は、希土類イオン、例えばエルビウム、イッテルビウム、プラセオジミウム、ネオジム等を含む。

また、ドーパ剤は、例えば、ファイバあるいはコア領域への回折格子の書き込みを容易にするために、あるいはコア領域の屈折率を増大させるために感光性材料、例えばゲルマニウムを含んでもよい。

【0076】

本発明はまた、半導体および／または誘電体材料のような材料を使用して製造される平面光学部品 (planar optical component) の場合におけるPBG構造に

も適用する。このPBG構造は、シリカをベースにした平面導波構造 (planar waveguiding structure) に平行エア充填ボイド (parallel air filled void) を形成することによって得ることができる。

#### 【0077】

このような部品の1つの例は、高い隆起部 (ridge) が上を覆われる場合、当業者は空気シリンダを形成できる (時には避けることが困難である) ことを知っているプラズマ強化化学気相成長 (Plasma enhanced chemical vapour deposition; PECVD) 法を使用して得ることができるであろう。したがって、本発明によれば、より大きい空気シリンダを開発することによってこれらの製造特性を改良し、その可能な外観 (appearance) と光学的パワーがシリンダ軸に沿って誘導される光結晶構造を規定するのに必要とされる周期性とを結合することが示唆される。これらの特性は、2次元のPBG構造が規定されてもよい単一平面で、あるいは以前に略述した設計による3次元構造の形成の可能性を開いた多レベル空気シリンダの製造の更なる開発において使用することができる。

#### 【0078】

また、細長要素に隣接する材料のようなファイバ材料に不純物を添加することが望まれよう。それとは別に、材料の層はその長さに沿っていること望まれよう。この場合、少なくとも一つのプリフォーム要素が所定の材料で被覆されてもよいしあるいは不純物添加されてもよい。

第8の態様では、本発明は、光ファイバを製造するプリフォーム (preform) に関し、プリフォームは、縦方向に長さおよびそれに垂直な断面を有し、このプリフォームは、

各々がプリフォームの縦方向に延びる中心軸を有する細長の一次要素であって、プリフォームの長さとは本質的に同じである縦方向に長さを有する細長の一次要素と、

各々がプリフォームの長さよりも短い小さい長さにわたってプリフォームの縦方向に延びる挿入要素とを備えている。

#### 【0079】

上記の細長の一次要素および挿入要素は、非周期的な構造および少なくとも実

質的に2次元の周期的な構造の両方を形成し、非周期的な構造は、実質的に2次元の周期的な構造によって囲まれ、

この周期的な構造は、縦方向に垂直な断面において、少なくとも1つの単位セルによって規定され、各単位セルに対して、

第1の円は、単位セルの外部に置かれていない中心を有し、かつ任意の一次要素のどの部分も囲まない可能な最大円領域として規定され、上記の第1の円の周囲は挿入要素を規定する。

#### 【0080】

挿入要素は、少なくとも断面の一部分において、三角形構造を規定する。各単位セルに対して、第1の円の中心からこの第1の円の半径の1.5倍あるいはそれよりも小さく、例えば1.2倍あるいはそれよりも小さい、例えば1.1倍あるいはそれよりも小さい距離の範囲内にあるこれらの細長の一次要素の中心は3つあるいはそれ以上の辺を有する第1の多角形の頂点を規定する。この第1の多角形は正多角形である。

#### 【0081】

他の第1の多角形は、6あるいはそれ以上の辺、例えば12あるいはそれ以上、例えば18あるいはそれ以上、例えば36あるいはそれ以上の辺を有する。

複数の挿入要素は、プリフォームの縦方向に延びる軸に沿って配置される。少なくとも細長の一次要素の一部分は、その断面において、三角形構造、蜂の巣構造、あるいはカゴメ構造を規定する。細長の一次要素の各々の外側表面は一次領域を規定し、挿入要素の各々の外側表面は二次領域を規定することができる。任意の一次領域の面積は任意の二次領域とは異なる。

#### 【0082】

各単位セルに対して、全二次領域の面積の和は、この単位セルの面積の0.09倍よりも大きく、例えばこの単位セルの面積の0.1倍よりも大きい、例えば0.15倍よりも大きい、例えば0.2倍よりも大きい、例えば0.25倍よりも大きい、例えば0.3倍よりも大きい、例えば0.4倍よりも大きい、例えば0.5倍よりも大きい、例えば0.6よりも大きい、例えば0.7よりも大きい、例えば0.8よりも大きい。

## 【0083】

プリフォームにおいては、任意の二次領域は任意の一次領域のある定数倍よりも大きく、この定数は、1.1よりも大きく、例えば1.2倍よりも大きい、例えば1.3倍よりも大きい、例えば1.4倍よりも大きい、例えば1.5倍よりも大きい、例えば2倍よりも大きい、例えば4倍よりも大きい、例えば7倍よりも大きい、例えば10倍よりも大きい、例えば20よりも大きい、例えば50よりも大きい。

## 【0084】

細長の一次要素は中空であってもよいのに対して細長の挿入要素は中実の固体であってもよい。細長要素はシリカをベースにした材料であっても良い。代用として、この細長要素はポリマーをベースとしたものでも良い。

プリフォームは更に、各々がこのプリフォームの縦方向に延びる中心軸を有し、各々が単位セルの外部に置かれていない中心を有し、各々が単位セルの面積を超えない面積を有し、各々がこのプリフォームの長さを実質的に同じ縦方向の長さを有し、各々が細長の一次要素の任意の領域と異なる他の領域を規定する他の細長要素を含む。この他の細長要素は中実の固体であってもよい。

## 【0085】

位置に関しては、上記の他の細長要素は少なくとも部分的に第1の円内に含まれる。好ましくは、少なくとも上記の他の細長要素の一部分の中心は第1の円の中心と実質的に一致する。

プリフォームはさらにコア領域を含み、このコア領域は、非周期的な構造として規定され、このコア領域は、少なくとも実質的に2次元の周期的な構造によって囲まれる。好ましくは、このコア領域は、このコア領域を囲む少なくとも実質的に2次元の周期的な構造が少なくとも2つの周期を含む中空領域を含む。

## 【0086】

引き出し工程 (drawing process) 中、更なる初期工程 (initiative) が大きなボイド充填率を確実にするために使用されてもよい。これは、米国特許第5,802,236号に開示されているような気体をファイバのボイド中に供給し、毛細管 (capillary tube) の一端を密封することを含む。さらに本発明に対して

、ジグ（jig）および毛細管（ならびに任意のロッド）を一緒にプリフォームの一端あるいは両端の中に溶融することによってプリフォームの全端を密封することは好ましい。ジグが特定の位置にある場合、プリフォームに沿った特定の位置で密封することさえ興味があり得る。それとは別に、好ましい実施例では、周期的なクラッド構造の高屈折率中心（high-index center）を含まないボイドだけが密封される。それによって、残りのボイド（これらは高屈折率中心を含むので、望ましくないボイド）は、大きいままであることが望まれるボイドよりも更に速く崩壊するであろう。

#### 【0087】

したがって、第9の態様において、本発明は、プリフォームを製造する方法に関し、このプリフォームは縦方向にある長さおよびそれに垂直な断面を有し、この方法は、

プリフォームのためのホルダ（holder）を用意するステップであって、このホルダは、所定の形状およびその内面に細長い溝を有し、この溝は、上記のプリフォームの長さを実質的に同じである縦方向の長さを有するステップと、

各々がプリフォームの縦方向に延びる中心軸を有する細長の一次要素を用意するステップであって、上記の一次要素は、上記のプリフォームの長さを実質的に同じである縦方向の長さを有するステップと、

各々が上記のプリフォームの長さよりも短かいある長さにわたって縦方向に延びる二次要素を用意するステップと、

上記のプリフォームの縦方向に沿って実質的に同じ位置に複数の二次要素を位置決めするステップとを含む。

#### 【0088】

第10の態様において、本発明は、縦方向を有する導波管構造の光ファイバに関し、この光ファイバは、

上記の縦方向に沿って延びるクラッド領域であって、このクラッド領域は、各々が導波管の縦方向に延びる中心軸を有する細長要素を含む少なくとも実質的に2次元の周期的な構造を含み、その細長要素がこの細長い要素に隣接する任意の材料の屈折率よりも低い屈折率を有するクラッド領域と、

縦方向に沿って延びるコア領域であって、このコア領域は、縦方向に沿って延びる少なくとも1つのボイドを含み、この少なくとも1つのボイドの断面積が前記のクラッド領域内に含まれる任意の細長要素の断面積のある定数倍よりも大きく、この定数は、1より大きく、例えば1.3、例えば1.5、例えば1.7、例えば2、例えば3、例えば5、例えば10、例えば20、例えば50よりも大きいコア領域とを含む。

#### 【0089】

矩形の中心は、可能な最小矩形領域の中心として規定されてもよく、その中心はコア領域の外部に置かれていなく、この矩形は少なくとも1つのボイドを囲み、

矩形率 (rectangularity) は、矩形の最長側の長さを矩形の最短側の長さで割ったものと規定され、

第1の軸は可能な最長頂点として規定され、矩形の中心は前記の第1の軸上に置かれ、この第1の軸の各端は少なくとも1つのボイドの1つの内部に囲まれ、

第2の軸は上記の第1の軸に実質的に垂直に規定され、この第2の軸は可能な最長頂点として規定され、上記の矩形の中心は上記の第2の軸上に置かれ、前記の第1の軸の各端は少なくとも1つのボイドの1つの内部に囲まれ、かつ

偏心率 (eccentricity) は、上記の第1の軸の長さを第2の軸の長さで割ったものと規定される。

#### 【0090】

矩形は正方形であってもよく、偏心率は1よりも大きく、例えば1.1、例えば1.3、例えば1.5、例えば1.7、例えば2、例えば3、例えば5、例えば10よりも大きい。

矩形率は、1よりも大きくてもよく、例えば1.1、例えば1.3、例えば1.5、例えば1.7、例えば2、例えば3、例えば5、例えば10よりも大きくてもよい。

#### 【0091】

(発明の詳細な説明)

PBG効果によって作動される導波管に対する最も基本的な要求は、周期的な

クラッド構造が存在し、このクラッド構造がPBG効果を示すことができることである。PBG効果を示す周知の構造はシリカ中の大きなエアークボイドの正三角形配置である。

#### 【0092】

図1において、正三角形構造は、バックグラウンド材料(1)、ボイド/ロッド(2)、2つの隣接するボイド/ロッド間の中心間隔 $\Lambda$ 、およびボイド/ロッドの直径 $d$ の表示で示されている。光ファイバの興味ある特定の正三角形構造はシリカのバックグラウンド材料中のエアークボイドの周期的な配置である。このような構造は、上記に引用されたBirks外の文献によって述べられているような光バンドギャップ効果を示すことができる。微細構造を議論する場合に重要なパラメータは、縦のファイバ方向に垂直な断面における、クラッドの周期的な部分の全断面積に対する全ボイド面積のこの比率として規定されるクラッドのボイド充填率 $f_v$ である。最終ファイバは、縦方向に沿って一様(invariant)であると考えられるので、上に規定された充填率は周期的なクラッド構造におけるボイド材料の全体積充填率(total volume filling fraction)に等しい。

#### 【0093】

シリカ中の円形エアークボイドの三角形配置によって示される光バンドギャップの図が図2に示されている。この特定の構造に対するボイド充填率は45%(Birks外の文献に示されているそれに等しい)である。図2に示された数値シミュレーションに対して、シリカのバックグラウンド材料の屈折率は1.45に等しいように設定され、ボイドの屈折率は1.0に等しく設定された(空気あるいは真空あるいは真空ボイドを模擬するため)。

#### 【0094】

この図は三角形光バンドギャップ構造の指数(屈折率)を解析したものを示したもので、当業者は、構造内で許容されるモードの屈折率は、伝搬定数 $\beta$ (ボイドの中心軸に平行である波動ベクトル(wave vector)のその成分として定義される)を許容されるモードの波数(wave number) $k$ で割ったものとして定義されることを認めるであろう。

#### 【0095】



このシミュレーションは、許容されるモードがない4つの領域（PBG境界によって示される）を示す。これらの4つのいわゆる完全な平面外部（out-of-plane）の2次元のPBGは、三角形構造の周期的な性質により単独で示されている。4つのPBG領域内では、三角形構造に対するモードは全然許容されないので、三角形構造はそれ故電磁放射線を反射するために使用することができる。

#### 【0096】

PBG領域のいくつかは、三角形構造が電磁放射線（electromagnetic radiation）を反射できることを示すいわゆるエアラインを横断することに注目するのは非常に重要であり、この電磁放射線は、自由空間波長（free-space wavelength） $\lambda$ およびPBG領域がエアラインの下にあるかあるいはエアラインにオーバーラップする $\beta$ 結合体（ $\beta$  combination）の特定の範囲に対して空気から入射する。振動数は、中心間ボイド間隔 $\Lambda$ が正規化ために使用された正規化単位（normalised unit）で与えられるので、三角形構造に対しては、空気から入射する可視光および近赤外線（波長が約 $1\ \mu\text{m}$ ）を反射することは明らかで、約 $2\ \mu\text{m}$ およびより小さい $\Lambda$ 寸法が必要とされる。したがって、空気充填コア領域が空気からの光を反射するPBG構造によって囲まれる光ファイバを製造するために、最終ファイバは、大きな空気充填率を必要とするばかりでなく、非常に小さい寸法にする必要もある。

#### 【0097】

中空コアに光を完全に誘導するバンドギャップファイバの数値シミュレーションの例は図3に示されている。このファイバは、大きな空気（あるいは真空）コアを囲む正三角形クラッド構造を有する。図3のファイバは45%のボイド充填率を有する。このファイバが約 $1.5\ \mu\text{m}$ で作動すべきである場合、ファイバのクラッド構造の所要寸法は、 $1.9\ \mu\text{m}$ の中心間のボイド間隔である（図3のモードは、正規化振動数に対して計算され、このモードは、図2のバンドギャップ領域内で $\Lambda/\lambda = 1.3$ 附近で発生した）。現在公知の製造技術を使用する場合は、クラッド構造中に大きなボイド充填率（15%以上でよい）を有すると同時に必要とされる小さい寸法（ $2\ \mu\text{m}$ 以下）を有するファイバを実現することは不可能であった。

## 【0098】

しかしながら、本発明者達は、密に詰め込まれたアレイ中に現在用いられている毛細管の積み重ねをすることは大きなボイド充填率を有する光結晶ファイバを製造する最適製造技術を示さないことが分かった。現在使用されている密に詰め込む技術の代わりに、本発明者達は、小さい寸法に対しても非常に大きなボイド充填率を有するロバストな (robust) ファイバが製造できる新しい製造技術を実現した。

## 【0099】

新しい種類のプリフォーム (preform) を製造することに主に関する製造技術は図4に示されている。この製造技術は、密に詰め込まれていない (non-close-packed) アレイ中に毛細管 (4) を支持するためにプリフォームの全長に延びない短いジグ (3) を使用する。それによって、現在可能であるものよりも大きなボイド充填率でファイバが製造できる。

## 【0100】

好ましい1実施例では、毛細管 (4) は蜂の巣構造に配置され (図4を参照)、ジグ (3) は三角形構造で配置されている。ジグはプリフォームの全長に延びていないので、断面にジグが存在しないプリフォームの (大きな) 断面がある。

図5では、プリフォームの好ましい実施例のためのこのような断面が示されている。図5から明らかなように、全てのボイド (5) (毛細管導入ボイド (6) とジグ導入ボイド (7) との間の区別なしで) は三角形構造で配置されている。この構造の単位セルは (8) で示されている。図5からも明らかなように、ジグ導入ボイド (7) のサイズは毛細管導入ボイド (6) のサイズよりも大きい。これは、プリフォームの現在の製造技術に比べてより大きな全ボイド充填率 (total void filling fraction) が達成されるという明らかな効果を有するばかりでなく、より大きなボイド充填率を最終ファイバで保つことができるという明らかな効果も有する。この理由は、プリフォームの引き出し/引っ張り (drawing/pulling) 中にボイドのサイズを最終ファイバに減少させる表面張力に関するものである。

## 【0101】

非常に小さい寸法に引き出されるファイバに対してしばしば見られる製造中のボイドの全崩壊さえも避けることができる（あるいは少なくともより高い引き出し／引っ張り温度に対して行われるであろう）。表面張力はボイドの半径に強く左右され、半径が減少するにつれて表面張力が非常に強く増大するので、より大きいボイド（7）（新しい製造技術によって導入されたボイド）は、毛細管（6）の内部表面から形成されたボイドよりも弱い表面張力を受ける。この表面張力は図6に示されている。

#### 【0102】

現在使用される技術よりも優れている新しい製造技術の長所を示すために、2つの異なるファイバに対するクラッドにおける全ボイド充填率を比較する。比較のためのファイバの一方（ファイバ1）は、現在公知の技術（毛細管の密に詰め込まれたアレイを使用するもの）を使用して製造され、他方（ファイバ2）は、毛細管が蜂の巣構造で配置される（管を支持し、大きなボイドを作るためにジグを使用する）新しい技術を使用して製造される。両方のファイバで使用される毛細管は同じであるが、ファイバ2はファイバ1の毛細管数の2／3だけを含む。引き出し／引っ張りプロセス中のファイバ1の全ボイド充填率 $f_{t,1}$ は、第1近似として下記の（1）式のように記述できる。

#### 【0103】

$$f_{t,1} = x(t) \cdot f_{i,1} \quad (1)$$

ここで、 $f_{i,1}$ はファイバの初期ボイド充填率であり、 $x(t)$ はボイドサイズの減少を温度の関数として記述するものである。シリカは温度を高くする（これはプリフォームを小さい寸法に引き出し／引っ張るために必要とされる）とより滑らかになる（fluent）ので、表面張力は、温度を高くするとボイドのサイズを減少させることになるであろう。ファイバ2のボイドの2／3だけがファイバ1のボイドと同一で、従ってボイドの1／3がファイバ1より大きいファイバ2に対して、全ボイド充填率 $f_{t,2}$ は、第1近似として下記の（2）式のように記述できる。

#### 【0104】

$$f_{t,2} = (2/3) \cdot x(t) \cdot f_{i,1} + y(t) \cdot f_{i,2}(t) \quad (2)$$

ここで、 $f_{1,2}$  はジグ導入ボイドの初期ボイド充填率であり、 $y(t)$  は、ジグ導入ボイドのサイズの減少を温度の関数として記述するものである。係数  $x(t)$  および  $y(t)$  は、2種類のボイドが異なる形状を有するというこのため一般に同じでない、異なる表面張力を受けるであろう。

#### 【0105】

新しい製造技術から生じる重要な長所は、表面張力が毛細管導入ボイド(6)のサイズを最初に減少させるので、ファイバ2に対するジグ導入ボイド(7)は広がる(open up)傾向がある(あるいは少なくともそのサイズの減少が著しく妨げられる)ということである。したがって、ジグ導入力(jig-introduced force)に比べて毛細管導入ボイドに対する表面張力がより強いほど、 $x(t)$  係数が最初は  $y(t)$  係数よりも速く減少するという効果を有する。

#### 【0106】

毛細管導入ボイドおよびジグ導入ボイドの崩壊の簡単なシミュレーションが実行されて、上述の傾向が図7に示されている。この図は、新しい製造技術の重要な長所、すなわち、ジグ導入ボイドのサイズが毛細管導入ボイドよりもより高い引き出し/引っ張り温度に対して維持できるということを示している。これは、 $y(t)$  がおよそ1に等しい温度領域が  $x(t)$  のその温度領域に比べて広いことから分かる。さらに、ジグ導入ボイドが最初は毛細管導入ボイドよりも大きいということは、新しい製造技術を使用して実現されたファイバ(ファイバ2)に対する全ボイド充填率が‘通常の’ファイバ(ファイバ1)の全ボイド充填率よりも大きいことを意味する。

#### 【0107】

70%の初期ボイド充填率が毛細管導入ボイドのために使用され( $f_{r,1} = 0.70$ )、40%の初期ボイド充填率がジグ導入ボイドのために使用される( $f_{r,2} = 0.40$ ) 2つのファイバの全ボイド充填率(total void filling fraction)が図8に示されている。この図は、新しい製造技術を使用して実現されたファイバに対する2つの重要な長所を示している。まず第一に、与えられの引き出し/引っ張り温度で得られる全ボイド充填率が大きいということである。引き出し/引っ張り温度は、小さい寸法を有するファイバを実現するために最も重要な

要因であるので（より高い温度は、ファイバをより小さい寸法に引き出し／引っ張りを行うことができることを意味する）、この第1の長所は、小さいファイバ寸法に対して大きなボイド充填率を有する微細構造ファイバを製造するために重要である。第二に、ボイドが崩壊される（ボイド充填率がゼロに減少する）臨界温度が新しい製造技術の結果として増大することが分かる（ $t_2 > t_1$ ）。ファイバを製造できるこの温度範囲の増大は、ある一定のボイド充填率が最終ファイバに対して望まれる場合、ファイバは新しい製造技術を使用してより高い温度で製造できることを意味する。

#### 【0108】

したがって、新しい製造技術は、現在可能であるものよりも大きなボイド充填率を有するファイバの製造を可能するだけでなく、さらにボイドの全崩壊無しにより高い温度でファイバを製造する非常に重要な可能性をもたらす。より高い温度でファイバを製造できることは、ファイバのより容易な製造ならびにファイバの中心軸に沿ったより高い均一度を与える。より容易な製造および均一性の増大はファイバのより良い再現性（reproducibility）を意味するので、これらの長所はファイバの商用研究のために重要であり得る。また、ファイバに重大な散乱損失（scattering loss）を生じる得る表面の粗さという重要な面に関して、より高い温度でファイバを製造できることは、ボイドとそれによって散乱損失を減らすバックグラウンド材料との間のより滑らかな境界の実現を可能にする。

#### 【0109】

これまでは、主にバンドギャップ誘導光ファイバのクラッド構造の特性に関して本発明を詳細に説明した。クラッド構造の最適化はどの特定のコアを考えるかに強く左右されるので、以降に、コア領域の検討について述べる。本発明に対するこれらのコアは、好ましくは空気、その他の気体、液体あるいは真空を含む中空（hollow）である。

#### 【0110】

光結晶の周期性を局部的に破壊することによって、周辺のパルク光結晶（bulk photonic crystal）とは異なる光学特性を有する空間領域を作り出すことができる。このような欠陥領域は、周辺的全周期的な（full-periodic）構造の禁止

ギャップ (forbidden gap) 内部にある振動数を有するモードを含む (support) 場合、これらのモードはそれによって導波管のコアを形成する欠陥に強く閉じ込められる。これは、PBG誘導ファイバの動作のよりどころになる原理、すなわち光結晶クラッドによって示された全平面外部 (complete out-of-plane) の2Dバンドギャップおよび非常に強い横方向制限 (confinement) を達成することができる空間領域を形成する正確に設計された欠陥である。周辺の周期的な構造とは異なる光学特性を示す (すなわち集中モード (localised mode) を含むことができる) この欠陥領域に対して、欠陥領域がその周辺よりも高い屈折率を有することが要件ではないことに注目することが重要である。

#### 【0111】

非周期的な誘電体周辺媒体 (surrounding media) の場合、電界集中 (field localisation) が生じ得る場合 (もちろん、全ての従来の光導波管に利用される全内反射の場合である) だけが高屈折率コア領域を得るためのものである。その周辺よりも低い屈折率を有する領域に閉じ込められた漏れ無しの光の誘導は、したがって、屈折率誘導導波管理論 (index guidance waveguide theory) から可能であると予想されないが、しかし周辺材料がPBG効果を示す場合、低屈折率欠陥領域でさえも光を集中できるかもしれず、それによって (新しい) 非常に異例な導波管の役目を果たす。

#### 【0112】

図2のような三角形クラッド構造および大きな中空コア (空気に等しい屈折率を有する) を有する微細構造ファイバの数値シミュレーションは図3に示される。この図は、主に空気中 (あるいは真空中) に集中される誘導モード (guided mode) に対して電界の平方の分布を示している。このファイバは、クラッドの45%のボイド充填率およびクラッド中の単一ボイドのサイズのおよそ1.4倍に相当するコアサイズを有する。ファイバ構造の中心部の輪郭 (contour) (コア領域を含む) は点線によって示される。制限モード (confined mode) は、およそ  $1.3\Lambda/\lambda$  の正規化振動数で光バンドギャップ領域の内部にある ( $\lambda$ ,  $\beta$ ) 値に対するコア欠陥に集中されることが分かった。

#### 【0113】

図2から、このような値が光バンドギャップの中の1つがエアラインにオーバーラップする範囲内にあることが分かる。したがって、特定の $(\lambda, \beta)$ 値を有する光はクラッド構造内で許容されないで、空気から入射される場合、反射され得る。これは、光が中空コア内に殆ど完全に集中される数値的に見いだされたモードと一致している。このモードはクラッド内のモードに結合することが許可されないで（このモードは光バンドギャップ内にあるので）、モードはファイバを通る漏れ無しの誘導を受けるであろう。このような特性、すなわち中空コアファイバ内の光の漏れ無しの誘導は、センサ分野および電気通信分野用に既に議論された一連の用途に対して途方もなく強い興味があることである。電界がファイバの中空コア内に完全に閉じ込められ、この中空コアが低吸収を有する真空あるいは気体であるような理想的な場合、図3のモードの伝搬損失は明らか極度に低くなり得る。

#### 【0114】

電界が中空コア中に部分的にだけあるあまり理想的でない場合さえ、吸収損失は少なくともクラッドバックグラウンド材料（例えば、純粋なシリカ）の吸収損失よりも低い。したがって、従来の全内反射誘導ファイバ（すなわち高屈折率コアファイバ）の低損失誘導に対する基本的な障害は、中空コア内に光を誘導するファイバの出現によって明らかに壊すことができる。電界を中空コア内に閉じ込めることができることは多数の更なる長所を有し、これらの長所の中には、高輝度（high intensity）がファイババックグラウンド材料を損なわないでファイバを通して透過できるということがある。それによって、どの高屈折率コアファイバに比べても非常に高いパワーが中空コアを有するPBG誘導光ファイバで伝達できる。更なる長所は、データが従来の光ファイバを通して伝送できる速度に決定的な制限を定める光ファイバの非線形効果の除去に関する。中空コアが近真空あるいは真に純粋な空気である場合、実際的には（実際的には任意のパワーレベルに対して）非線形効果はファイバ中で全然起きない。最終的には、中空コアが真空を含む場合、材料のばらつき（dispersion）はほとんど無視できる。

#### 【0115】

PBG効果を示すことはPBGをベースした導波管に対する基本的要件である

ので、当然、PBG効果を示すことができるクラッド構造のための設計を行うことは全ての中で最初に必要である。さらに、PBG領域の幅の増大およびPBG領域の拡大の両方を行うようにクラッド構造を最適化することが重要である。現在公知のファイバに比べて、本発明は、エアラインの下に延びるより広い光バンドギャップを提供する多数の改良されたクラッド構造を開示する。当業者が認識するように、より広いバンドギャップを示す構造は、コア領域内の集中モードのより強い閉じ込めを可能にする。より強い閉じ込めはより頑丈で、曲げに強いファイバを生じることになるので、広いバンドギャップに対して最適化にされる新しいクラッド構造は、当然、超低損失PBG誘導ファイバの将来の実現のために非常に重要である。ファイバの‘調整’範囲（‘tuning’-range）（すなわちPBG誘導ファイバが作動できる波長範囲）は、さらにバンドギャップの幅に直接関連し、クラッド構造を最適にする重要性はさらに強調して示される。

#### 【0116】

前述の検討は、中空コア内の光誘導を有する光ファイバの実現に対して、クラッド構造のために取り組まれるべき2つの主要な問題点があるということで要約される。すなわち、まず第一に小さい寸法ならびに大きなボイド充填率を有する周期的なクラッド構造を製造することと、および第二に、周期的なクラッド構造の形態を最適にすることである。

#### 【0117】

本発明者達は、周期的なクラッド構造の形態を最適にする設計の道筋を実現し、改良されたクラッド構造に対する設計の道筋を示すために、ブリッジ領域（bridging area）（ベイン（vein））によって接続された高屈折率領域（ノード（node））の概念が導入される。この概念を使用すると、正三角形光結晶は、ノードが3つの隣接するボイド間の領域である構造としてみなすことができ、2つのノードをブリッジする領域はベインであると示される（すなわち、ベインは正三角形構造の2つの隣接するボイド間の領域である）。正三角形構造に関して、低屈折率ボイド（9）、ノード（10）およびベイン（11）は図9に示される。

#### 【0118】

与えられたクラッド構造を最適化するために、付加要素を基本構造に導入する



ことによるバンドギャップの幅および拡張に及ぼす影響を解析することは重要である。ここで実証されているように、このような解析は、光結晶構造を最適にするために本発明者達によってとられた設計の道筋を裏付ける。基本事項は45%のボイド充填率を有する三角形構造で行われる。

#### 【0119】

この構造は図10に概略的に示されている(図2に示されたモード屈折率解析(modal index analysis)はこの構造に対するものである)。次に、図2の最高振動数でエアラインにオーバーラップするバンドギャップを解析することによってこの基本構造の変形に及ぼす影響に的が絞られるであろう。このバンドギャップは、最大構造寸法のためのエアラインにオーバーラップする(4つのうちの)1つであり、したがって実際のファイバで探求するのに最も容易であるので、このバンドギャップがこの解析のために選択される。

#### 【0120】

図11は、図10の正三角形構造に対する正規化振動数の関数としてバンドギャップの相対サイズを示している(タイプA)。相対バンドギャップサイズは、その中心振動数で割られた上部振動数と下部振動数との間の差として規定される。この図においては、変形三角形構造の3つの場合も含まれる。

##### (タイプB)

3つの隣接ボイド間の真中の位置に導入される付加的な格子間ボイド(12)(その全充填率は1%である)を有する正三角形構造である。このタイプの構造は、図12に概略的に示され、3つの隣接する空気ボイド間の真中の位置にとどまることが見いだされたこれらの小さい格子間ボイドとして従来技術の光結晶ファイバから公知である。これらの格子間ボイドは、同一の円形毛細管の密なパッキングを含む製造技術のためにクラッド構造に誤って導入されたものである。格子間ボイドはそれ自体蜂の巣構造を形成する。

#### 【0121】

##### (タイプC)

2つの隣接ボイド間の真中の位置に導入される付加的な格子間ボイド(その全充填率は1%である)を有する正三角形構造である。このタイプの構造は従来技

術から公知でなく、本発明によって保護されるものである。この構造は、図13に概略的に示される。この構造の格子間ボイド(13)はカゴメ構造で配置される。

#### 【0122】

(タイプD)

格子間ボイドの全充填率が5%であることを除いてタイプCと同じ構造である。

基本構造(格子間ボイドが無い)に対して、 $\Lambda/\lambda$ が約2.4でおよそ2.5%の最大PBGサイズが観察される。このサイズは、3つの隣接するボイド間の真中の位置でこの構造に格子間ボイドを加えることによって約1%に減少することが分かる。これとは対照的に、2つの隣接するボイドを接続する線上の真中の位置に殆ど同じサイズの格子間ボイドを導入することによってバンドギャップのサイズは著しく増加することが分かる。PBGサイズのさらに大きな増大( $\Lambda/\lambda = 2.4$ で5%まで)もこの位置で格子間ボイドのサイズをさらに増加させることによって達成され得る。タイプBと同様の構造であるが、5%の全充填率を有する格子間ボイドを有している構造に対して、バンドギャップが完全に近づけられることが見いだされたことをさらに強調されねばならない。

#### 【0123】

相対バンドギャップの増加は別にして、バンドギャップがエアラインにオーバーラップする値(この範囲は中空コアファイバのクラッド構造にとって重要であるので)でのバンドギャップの相対サイズを解析することはもちろん非常に重要である。このような解析は図14に示される。さらに構造タイプCおよびDは、従来技術から公知である構造よりも優れていることが分かる。

#### 【0124】

図14において、公知の構造に対する最適化構造の長所は図11よりもさらに明らかである。最適化構造タイプDは、(1に等しいモード屈折率値で比較されるべき)基本三角形構造に比べて4倍だけ相対バンドギャップサイズを増大させることが分かる。

最高 $\Lambda/\lambda$ 値に対してエアラインにオーバーラップするバンドギャップに的を

絞るように選択したけれども、4つのバンドギャップ全ての非常に強い抑圧（suppression）が構造タイプBに対して見られた（さらに、エアラインを横切ることさえない唯一つの狭いバンドギャップは、タイプBのよう構造であるが5%の充填率を有する格子間ボイドを有する構造に対して見られた）ことを強調しなければならない。

#### 【0125】

上述の結果は、高屈折率ノードおよびベインの概念が改良されたクラッド構造を設計するために本発明者達によっていかに使用されるかを示す。要するに、設計の道筋は、広いバンドギャップを得ることに関して光結晶構造を最適にするために、この構造は最も分離されたノード（isolated node）（高屈折率領域）を有するべきであり、このノードは最高屈折率を有する材料部品を含むべきである。最後に、当業者が認識するように、ノードは完全に分離されるべきである（したがって、ノードは個別の高屈折率導波管としての役目を果たす）。この最終的な要件は、2つの結果、すなわちまず第一にこの構造の全周期性（overall periodicity）は光の自由空間波長に匹敵すべきであることと、第二に、ボイド充填率に対する上限が実際存在することの2つを有することである。これらの結果の第一のものはこの構造の寸法に対してさらに別の制限を課す（非常に小さい構造が可視および近赤外線での動作に対して必要とされる）。これとは対照的に、ボイド充填率に対する上限は全ての実際のファイバに対しては関係ない。この上限は、中心間ボイド間隔に非常に接近している直径を有するボイドに対して存在するが、このようなサイズのボイドは光ファイバに対して必要とされる小さい寸法を有する構造に対して実現することは実際は不可能である。したがって、実際に、できるだけ多くノードを分離すると同時に大きなボイド充填率を保持することはファイバに対して最も最適化されたクラッド構造を提供する。付加（格子間）ボイドの中心が2つの隣接する一次ボイドの中心を接続する線上にほぼ位置する場合はベインは三角形光構造内で狭められてもよいし（それによってノードを分離する）、あるいは格子間ボイドが3つの隣接する三角形ボイド間の真中に置かれる場合は高屈折率中心（high-index center）の役目を果たすノードの能力が低下されてもよく、それらのいずれかであるので、格子間ボイドはその位置に応じ

て好都合であったりあるいは不都合であったりのいずれかであることは明らかである。さらに、クラッド内で三角形ボイド配置を有する光結晶ファイバで観察された格子間ボイドがいかにもードの中心に丁度位置するかということ（それによって、高屈折率中心およびPBG効果を示すクラッド構造の役目を果たすその能力を著しく傷つける）が強調されるべきである。

#### 【0126】

概略設計の道筋によれば、蜂の巣構造あるいはいわゆるカゴメ構造で配置された最大ボイドを有するクラッド構造も好都合である。蜂の巣構造の長所については、前に文献を引用して述べた（Broeng外の「Optics Communications, Vol.156(4~6), p.240, November 1998を参照）。蜂の巣構造およびカゴメ構造の両方は三角形構造よりも本質的に大きなノードおよび比較的狭いベインを有している。しかしながら、中空コアファイバで使用するためのクラッド構造の最適化に対して取り組まなければならない第2の問題点、すなわちバンドギャップが空気以下に延びなければならないことに関して、この必要な要件を満たす実際の蜂の巣構造もカゴメ構造もどちらも見つからなかった。実際の蜂の巣構造およびカゴメ構造に対して前述のエアラインの下に延びるバンドギャップが全然見つからなかったことは、これらの構造が同じサイズのボイドを有する三角形構造よりも本質的に低いボイド充填率を有するという事実に帰される。したがって、本発明者達は、ボイドの三角形状配置が中空コアPBGファイバで使用するために最適にされるクラッド構造に対して最適基準を形成することが分かった。

#### 【0127】

既に述べた新しい製造技術の更なる長所は、この製造技術が大きなボイド充填率を有する光ファイバの容易な性能を可能にするばかりでなく、それは前述の改良されたクラッド構造を含む最新の構造の柔軟な製造もまた可能にし、それによって中空コア内への光の閉じ込めを有するPBG誘導ファイバの実現に対する両方の要件を満足させることになる。

#### 【0128】

最適化クラッド構造の好ましい実施例は、図15に示されている（ジグを含まない部分でのプリフォームの断面図が示される）。このプリフォームは、毛細管

(14) がカゴメ構造内に配置され、小さい固体ロッド (15) が全三角形構造 (16) (毛細管 (14) およびジグ導入ボイド (17) から形成される) のノードに相当する位置で蜂の巣構造内に配置されているクラッド構造を有する。この図は、単に単一の毛細管および2つの固体ロッドを省くことによって周期的な構造を壊すことによって形成された最適化ファイバのための非対称コア領域 (18) の好ましい実施例を示している。

#### 【0129】

低屈折率コア領域を有するファイバの別の例は図3に示されている。本願に開示された全てのクラッド構造は種々のコア領域の実現と組み合わせることができる。本発明によって保護される欠陥 (あるいはコア) 領域の他の例は図16に示されている。さらに、この図は、その外側境界面で非周期的な構造によって囲まれる周期的なクラッド構造の例を示している。周期的な構造に対する限られた数の周期だけが光バンドギャップ効果を示すために必要とされるので、クラッドの内部部分だけは周期的である必要がある。したがって、図16に示されるように、外側クラッドは周期的である必要がない。この例では、ロッド (19) のリングは内側クラッドの周りに配置された (実際のファイバに対しては、最少の2つの周期が、クラッド構造が十分な光バンドギャップ効果を示すことができるために必要であると予想されることに注目すべきである)。広範囲の他の外側クラッド構造 (これは周期的である必要はない) は十分であるとみなしてもよい。外側クラッド構造の主機能は最終ファイバに頑丈さおよび安定性をも与えることである。誘導光はこの外側クラッドによって影響を及ぼされないので、したがってこのクラッドは、多数の種類材料、すなわち均質シリカから構成されてもよい。特に、周期性を含むプリフォームの部分の従来のオーバークラッド (overcladding) を使用できる。

#### 【0130】

光ファイバの場合、このオーバークラッドは、接合し (splice)、切断する (cleave) ことがより容易であるファイバを提供するようにファイバの強度をさらに改善できる。オーバークラッドファイバの第1の態様では、円形外側ファイバ断面が想像できる、従って標準ファイバ固定具 (fixture) を使用できる。しか

しながら、さらに他のオーバークラッドチューブ、例えば、ファイバの外側形状がファイバの主軸等の局所化 (localisation) を容易にすることができる高い偏光保持ファイバ (polarisation preserving fiber) の場合に好ましいかもしれない正方形あるいは六角形形状の外側ファイバ断面も想像できる。

#### 【0131】

従来のオーバークラッド方法の代替例として、PBGファイバの強いモード閉じ込めは、コア領域を囲むファイバが、周期的なクラッド領域の好ましい設計によって、毛細管およびジグを密にパッケージした配置に包み込むことによって構成される別の方式を提案することができた。位置を固定しなければならないこの周期的な領域の外部で、ここでの主要な問題点は周期的な構造を形成することにならないために、外側ファイバ構造 (外側クラッド領域に相当する) は、所定の場所で機械的に振動できるより細いガラスロッドのパッキングによって形成できる。したがって、プリフォームが後でファイバに引き込まれるとき、外側クラッド構造は、(近) 固体の外側クラッドを形成するために一緒に熔融される。細いガラスロッドの外部配置に対する唯一の要件は、ファイバの周期的な部分の外側の不均一な分布による表面張力のために周期的な著しい変形は生じない。

#### 【0132】

プリフォーム／ファイバの内部構造の例は図17に示された。この例では、付加的 (非周期的) 毛細管 (20) は、境界面の“平滑化 (smoothing)”を与えるためにコアとクラッド領域との間の境界上に配置される。このような“平滑化”は、表面の粗さによる可能な散乱損失を減らすために重要であり得る。

大きな“平滑化された”コア領域 (21) のさらにもう一つの例は図18に示される。

#### 【0133】

大きなコア領域の別の重要な例は図19に示される。コア (22) は強く非対称で、このようなコア設計は当然バンドギャップ誘導ファイバの偏光特性を制御するために非常に重要である。

ロッド (24) よりも大きい寸法の毛細管 (23) が新規のクラッド構造を形成するために使用される新しい融通性のある製造方法の別の例は、図20に示さ

れている。ジグは、毛細管／ロッドを支持するこの構造の製造ならびに大きなコア領域（25）の実現のために使用されてもよい。図20の設計のための平滑化されたコア領域は、コアを形成するために単一のさらに大きい周期性を壊す毛細管を使用することによっても実現できる。このようなさらに大きな毛細管コアチューブ（26）の例は図21に示されている。

#### 【0134】

異なるサイズの毛細管が使用される最新構造の他の例は図22に示されている。小さい毛細管（27）およびロッド（28）はより大きな毛細管（29）を支持するために使用される。

最終ファイバの構造はプリフォームの構造に似ているけれども、その構造は一般に同じでない。したがって、ここに述べた理想構造からの変形は製造中に導入されてもよいが、ファイバの基本的な物理的制限が保持される限り、構造は本発明によって保護されることを指摘すべきである。特に、ここに示された構造の例が必ずしも円形毛細管導入ボイドによって形成される必要がなく、任意の周期的に繰り返される断面形状は、クラッドならびにコアのPBGの構造を形成するために使用されてもよい（例えば、三角形、正方形、楕円あるいは任意の他の形状のボイドが適用されてもよい）。

#### 【0135】

最終構造の例は新しい製造工程を用いるように見えるかも知れないが、図23に概略的に示される。最終構造のシミュレーションのための数値精度が制限されたので、図23のように限られた解像度の図になる。したがって、ボイドとバックグラウンド材料との間の境界面は、実際のファイバのように滑らかには見えない。

#### 【0136】

最初の円形毛細管導入ボイド（30）が非円形形状になって、ジグ導入ボイドが殆ど円形（31）になる最終構造の別の例は図24に示されている。

ジグ導入ボイド（32）が平滑化された最終構造のさらにもう一つの例は図25に示される。

新しい製造方法は、例えば非常に小さいロッドをボイドのコーナーエッジ（co

inner-edge) に配置できる柔軟性を有するので、図26に示された最終構造も可能である。図25に比べて、ジグ導入ボイド(33)は $30^\circ$ の角度だけ回転されているように見える。

#### 【0137】

最後に、クラッド構造の議論のために、全てのここに開示されたクラッド構造はマルチコアファイバ(multi-core fiber)構成に適合されてもよいことに注目しなければならない。

光の受動誘導(passive guidance)は別にして、ここに開示されたクラッド構造およびファイバはいろいろの用途で使うことができる。図27は、本発明によるある長さのファイバ(34)、増幅されるべき入力信号(35)、増幅された出力信号(36)、及びポンプ信号(pump signal)(38)を供給する放射線源(37)を備えるファイバ増幅器の例を示している。ポンプ信号は一般的には、ある長さのファイバに導入されたドーパ剤をポンプする(pump)。

#### 【0138】

図28は、本発明によるある長さのファイバ(39)、出力信号(40)、及びポンプ信号(42)を供給する放射線源(41)を備える、レーザ放射線を供給するファイバレーザの例を示している。ファイバレーザは、レーザ空洞(cavity)内を進行する信号を反射する手段(43)をさらに備えている。

新しい機能性を有するPCFは、特別のドーピング材料あるいはファイバベース材料(例えば、ガラス、あるいはポリマー)から著しく離れた材料を有するファイバ内にさえも領域を導入することによって製造され得る。これらの付加材料は例えば、希土類ドーパ剤、特に紫外線(UV)感光材料、あるいは半導体、あるいは金属でさえあってもよい。

#### 【0139】

製造工程は、密にパッケージされた周期的な基盤材料構造(basis material structure)の輪郭のはっきりした位置に不純物が添加された(あるいは異なる)材料の細いロッドを導入することを含む。それとは別に、毛細管のあるものは不純物を添付された材料から製造でき、あるいはプリフォーム(あるいはその一部)は、基盤材料のロッドおよびチューブに拡散あるいは結合できる材料の溶剤中



に均一に配置することもできる。プリフォームの特定の部分は、更なる積み重ねあるいは他の処理の前に個別に処理できるので、この方式は非常に高度の柔軟性を可能にする。

【図面の簡単な説明】

【図1】

従来技術の光結晶ファイバからクラッド構造として公知である正三角形光結晶構造を示す図である。

【図2】

45%の比較的大きな空気充填率を有する正三角形光結晶構造のモード屈折率解析を示す図である。実線は、電界溶剤が結晶中に全然存在しないPBG境界を示している。‘有効クラッド屈折率’を示した線（点線）は、周期的な構造における最低周波数許可モードとして規定され、クラッド構造の有効屈折率  $n_{\text{eff}}$  に関する。いわゆるエアラインは一点鎖線によって示される。

【図3】

クラッドの大きな空気充填率 ( $f = 45\%$ ) および単一クラッド孔の面積よりも著しく大きい面積を有する空気（あるいは真空）充填コアを有する光結晶ファイバの空気誘導モードの理論予測を示す図である。モード強度はコアの中心の周りのリングでピークに達する。

【図4】

短いジグが大きなボイド充填率を有するファイバを製造するために導入された新しい製造技術を示す図である。このジグはプリフォームの全長には延びていない。

【図5】

新しい製造技術を使用して実現されたプリフォームの断面部を示す図である。この断面部はジグが延びていないプリフォームに沿った位置で示されている。

【図6】

最終ファイバに対するプリフォームの引き出し／引っ張り中のボイドを崩壊させる表面張力を示す図である。

【図7】

プリフォームの引き出し／引っ張り中のボイドの崩壊を説明するために理論的に使用される  $x$  パラメータおよび  $y$  パラメータの温度依存の例を示す図である。

【図 8】

従来技術の製造技術を使用して製造された光ファイバ用全ボイド充填率（点線）および本願に開示された新しい製造技術を使用して製造されたファイバ用全ボイド充填率（実線）の簡単なシミュレーションの例を示す図である。

【図 9】

クラッド構造の最適手順のために使用されるノードおよびベインの概念を示す図である。

【図 10】

基本三角形構造を示す図である。

【図 11】

$\Lambda/\lambda$  の最高値に対してエアラインを横切るバンドギャップのサイズを示す図である。すなわち、このバンドギャップは、固定波長に対する最大構造寸法に対して正規化周波数の関数として現れる。4つの異なる構造、すなわち45%の空気充填率を有する正三角形構造（タイプA、図10を参照）、小さい格子間エアーボイドが蜂の巣構造（この構造は微細構造ファイバの従来技術から公知である）に導入された変形三角形構造（タイプB、図12を参照）、小さい格子間エアーボイドがカゴメ構造に導入された最適化三角形構造（タイプC、図13を参照）および最後に構造タイプCと同じであるが、わずかに大きい格子間エアーボイドを有する最適化三角形構造（タイプD）が解析された。

【図 12】

3つの隣接する大きなボイド間の真中に置かれた小さい格子間ボイドを有する三角形構造を示す図である。格子間ボイドは蜂の巣構造を形成する。

【図 13】

2つの隣接する大きなボイド間の真中に置かれた小さい格子間ボイドを有する三角形構造を示す図である。格子間ボイドはカゴメ構造を形成する。

【図 14】

4つの構造タイプA、B、CおよびDのためのモード屈折率（バンドギャップ

の中心周波数を使用して計算された)の関数としてのバンドギャップのサイズを示す図である。

【図15】

プリフォーム断面の実施例の概略を示す図である。プリフォームは、毛細管、ロッドおよびジグを使用して積み重ねられる。この図に示された断面は、ジグが延びていない位置で取られたものである。毛細管はカゴメ構造で配置されている。このロッドは、毛細管よりも小さい外径を有し、3つの毛細管間の真中の位置に置かれている。非対称コア領域は、単一毛細管および2つのロッドを省略することによりプリフォームに容易に導入される。

【図16】

大きな周期性を破壊する領域がコアを形成するために導入されたプリフォームの断面の例の概略を示す図である。ファイバコアは、この特定の場合、7つのジグのアレイがコア領域を形成するために使用される新しい製造技術によって容易に実現できる。非周期的な構造は、内部クラッド構造（これはクラッド構造が光バンドギャップ効果を示すために周期的であることが必要とされる）の外に置かれている。

【図17】

蜂の巣配置の毛細管のクラッド構造の中心に置かれたほとんど円形のコア形成ボイドを示す図である。余分の毛細管はコアとクラッド領域との間の境界を“平滑化”するために導入された。

【図18】

蜂の巣配置の毛細管のクラッド構造の中心に置かれた非常に大きな、ほとんど円形のコア形成ボイドを示す図である。この場合も余分の毛細管がコアとクラッド領域との間の境界を“平滑化”するために導入された。

【図19】

大きな、ほとんど矩形のコアボイドが円形の蜂の巣配置の毛細管によって形成されたクラッド構造の中心に置かれた例を示す図である。矩形コアの断面積はクラッド構造の個々のボイドのどの断面積よりも大きい。このような非円形コア領域は光ファイバの偏光効果の制御のために重要である。

**【図20】**

新しい製造方法を使用して実現できる改良形構造の例を示す図である。

**【図21】**

新しい製造方法を使用して実現できる改良形構造の例を示す図である。この構造は、単一の大きな毛細管がコアを形成していることを除いて、図20とほとんど同じである。

**【図22】**

異なるサイズの毛細管およびロッドの組み合わせが使用された新しい製造方法を使用して実現できる改良形コア構造の例を示す図である。

**【図23】**

最終ファイバに生じ得るような周期的なクラッド構造の例の概略を示す図である。ボイドとバックグラウンドとの間の境界は滑らかであるべきであるが、構造の数値シミュレーションのために図にぎざぎざが表われている。

**【図24】**

最終ファイバに生じ得るような周期的なクラッド構造の例の概略を示す図である。

**【図25】**

最終ファイバに生じ得るような周期的なクラッド構造の別の例の概略を示す図である。

**【図26】**

最終ファイバに生じ得るような周期的なクラッド構造の別の例の概略を示す図である。

**【図27】**

本発明によるある長さの光ファイバを使用する光信号を増幅するためのファイバ増幅器を示す図である。

**【図28】**

本発明によるある長さの光ファイバを使用する光信号を出力するためのファイバレーザを示す図である。

【図1】

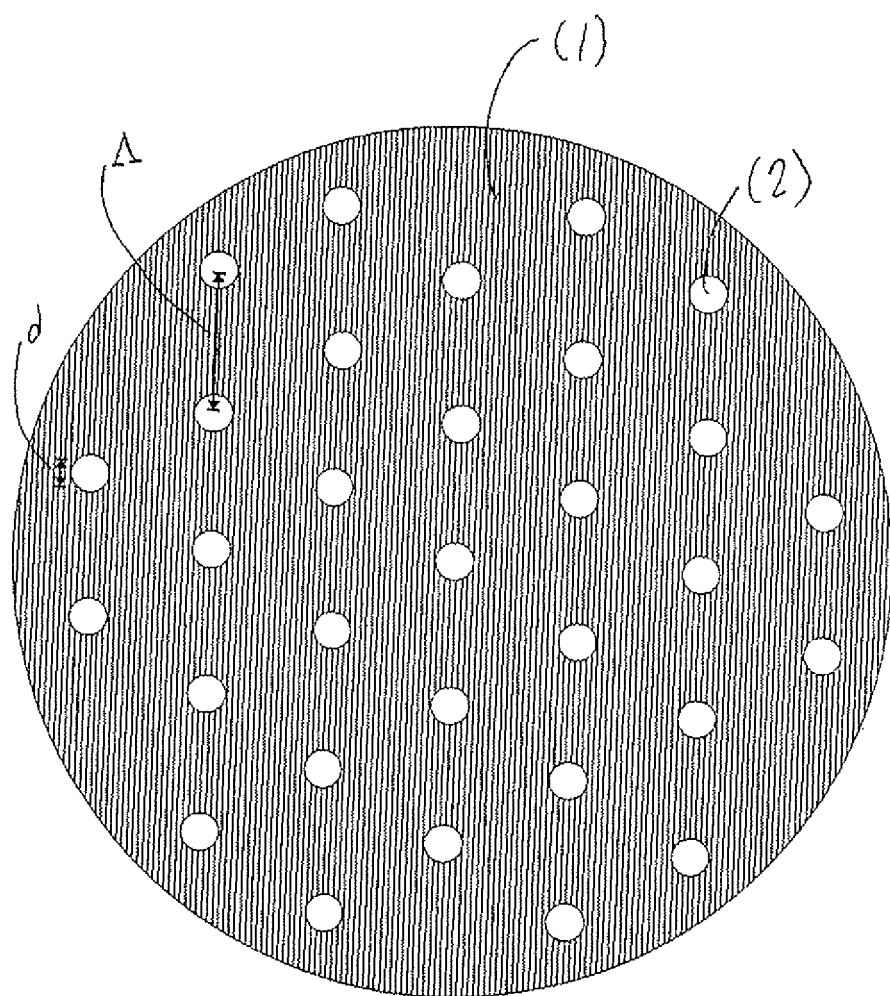


Fig. 1

【図2】

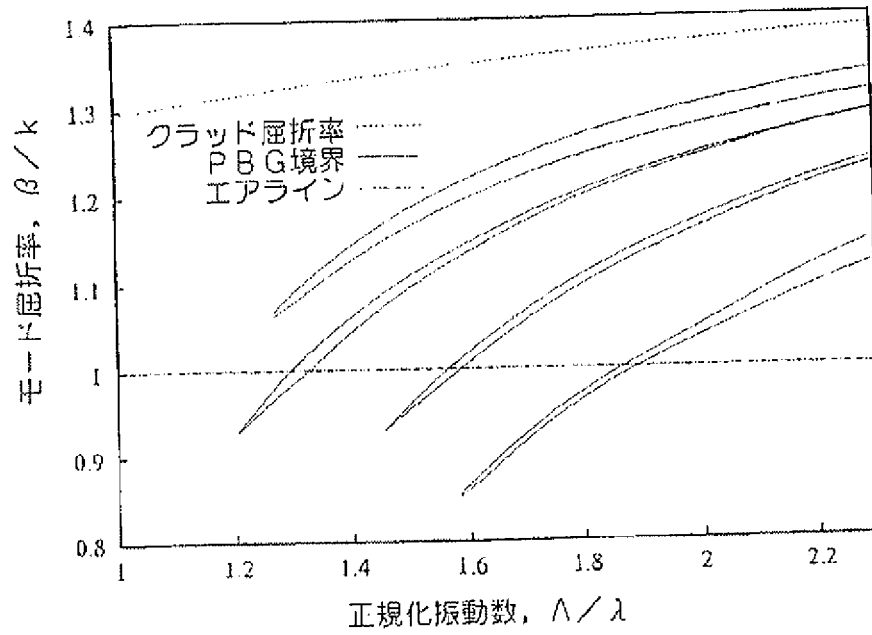


Fig. 2

【図3】

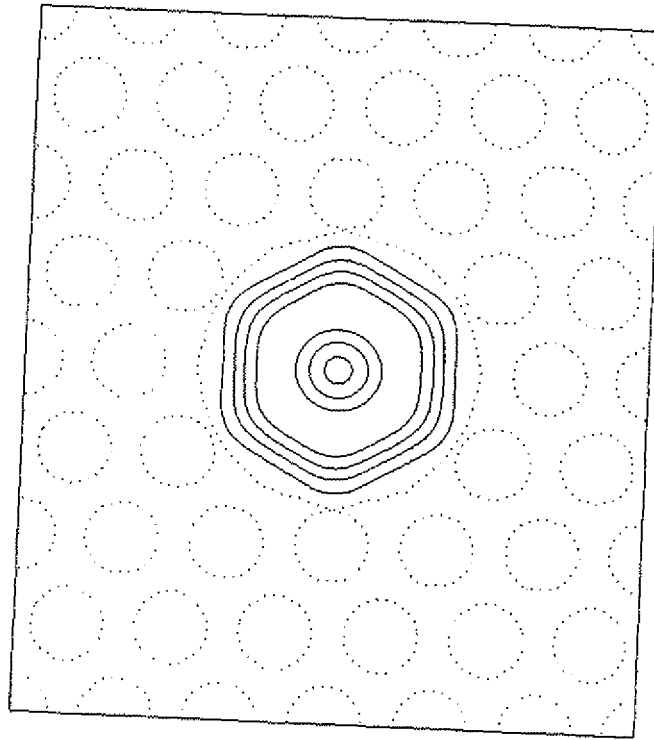


Fig. 3

【図4】

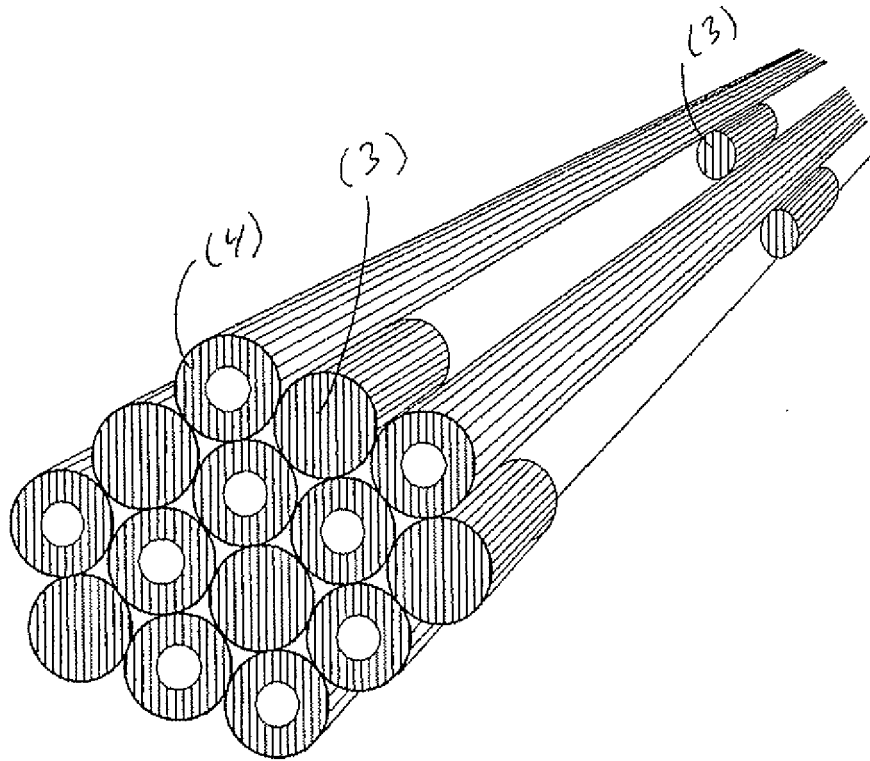


Fig. 4



【図5】

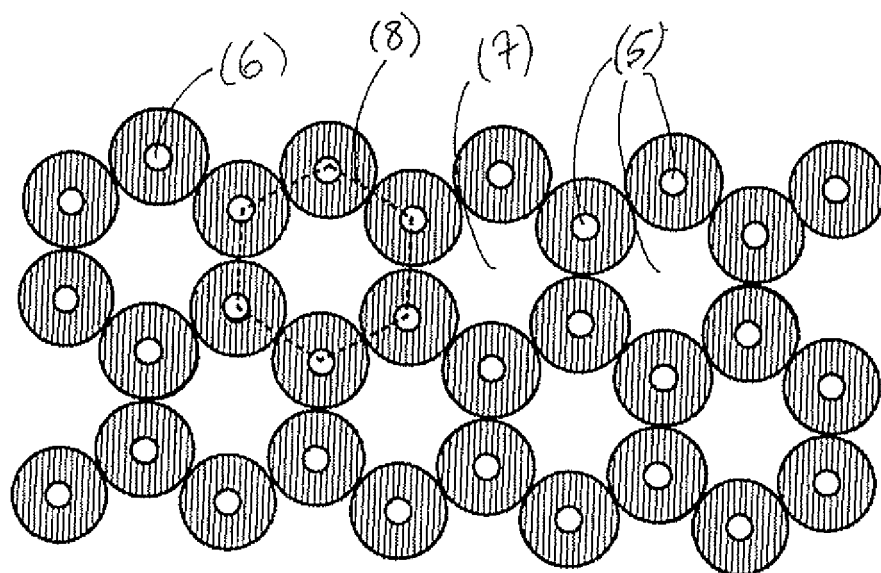


Fig. 5

【図6】

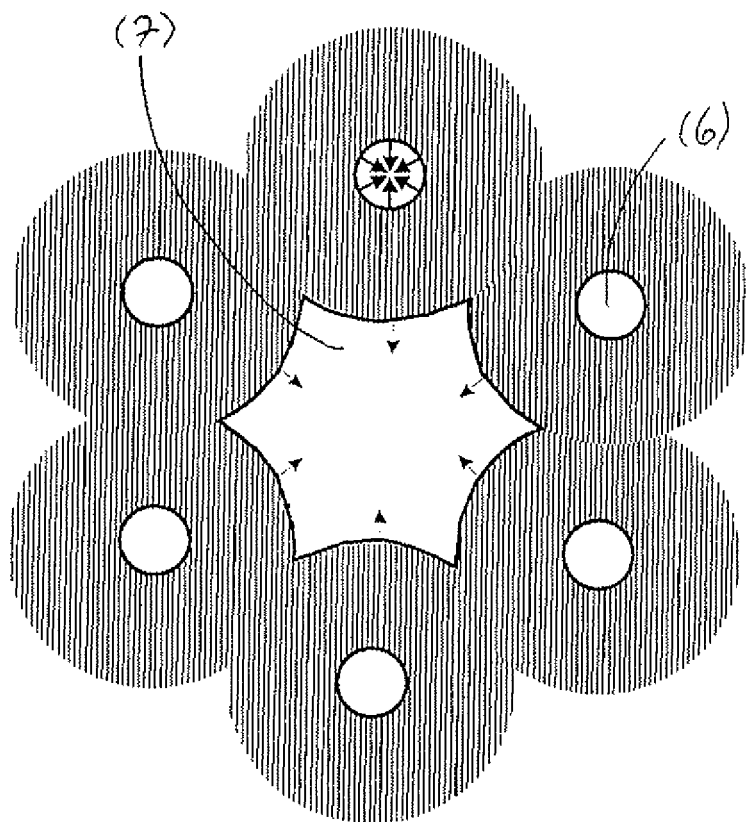


Fig. 6

【図7】

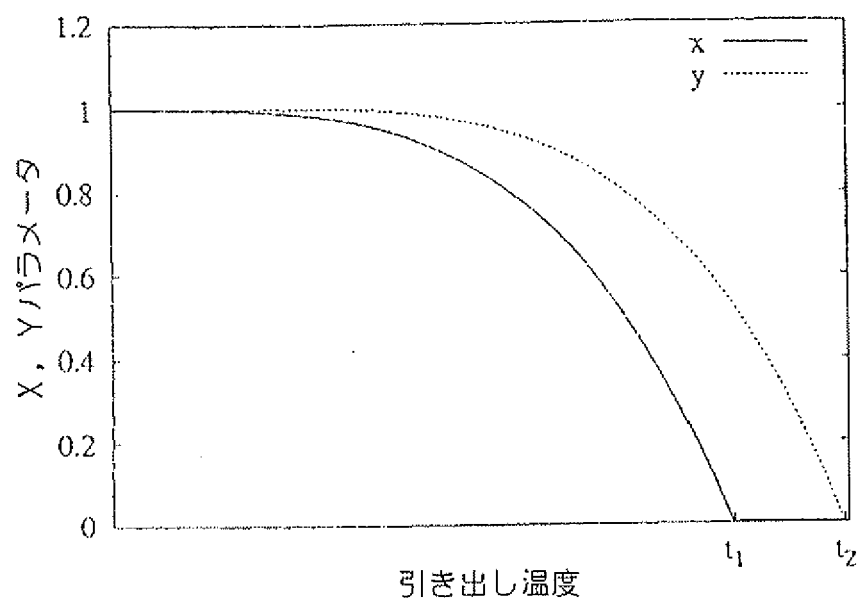


Fig. 7

【図8】

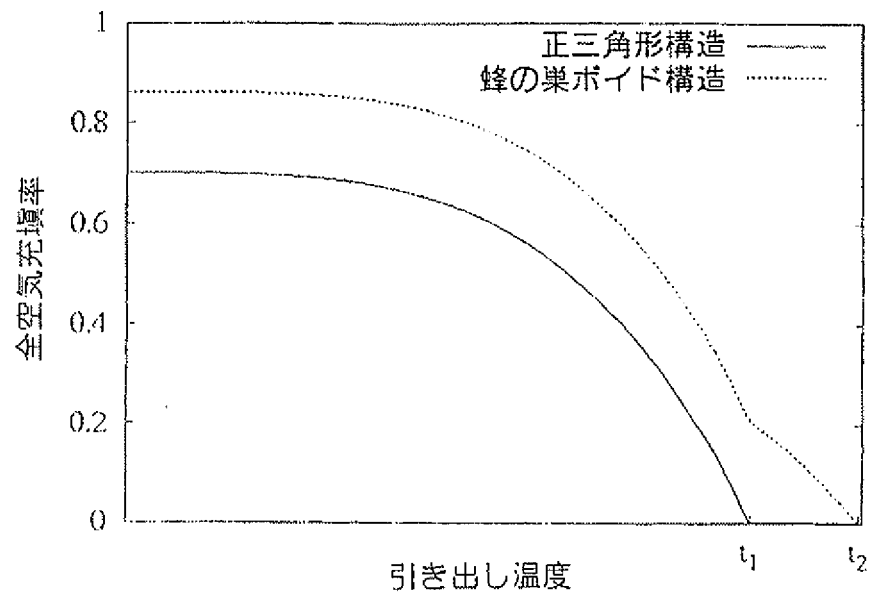


Fig. 8

【図9】

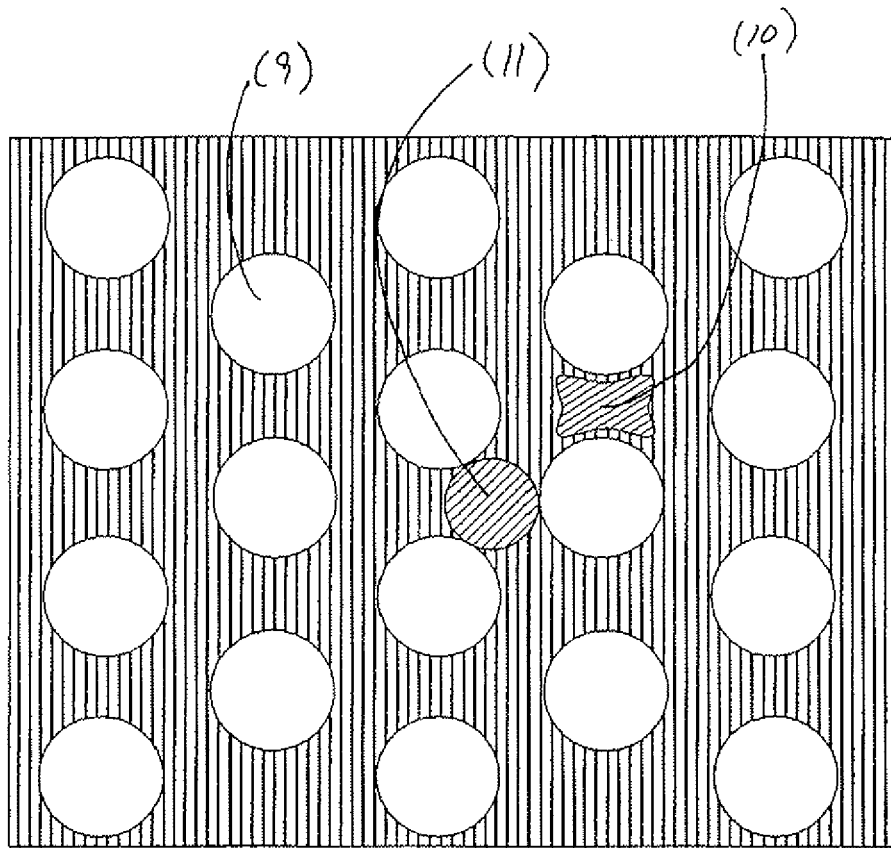
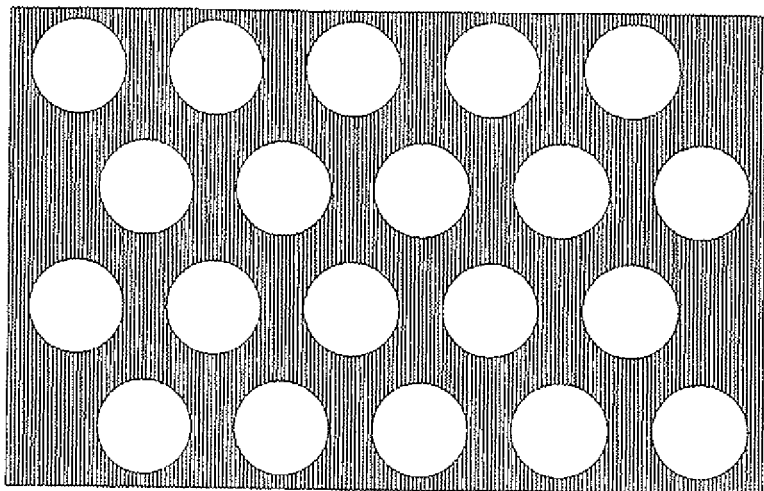


Fig. 9

【図10】

**Fig. 10**

【図11】

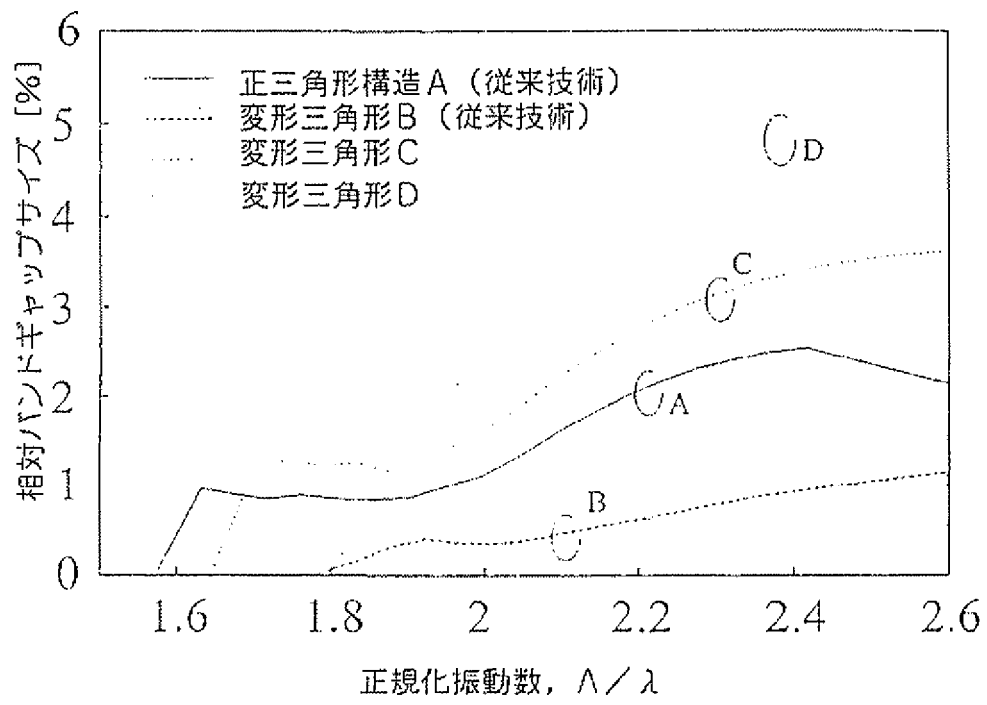


Fig. 11

【図12】

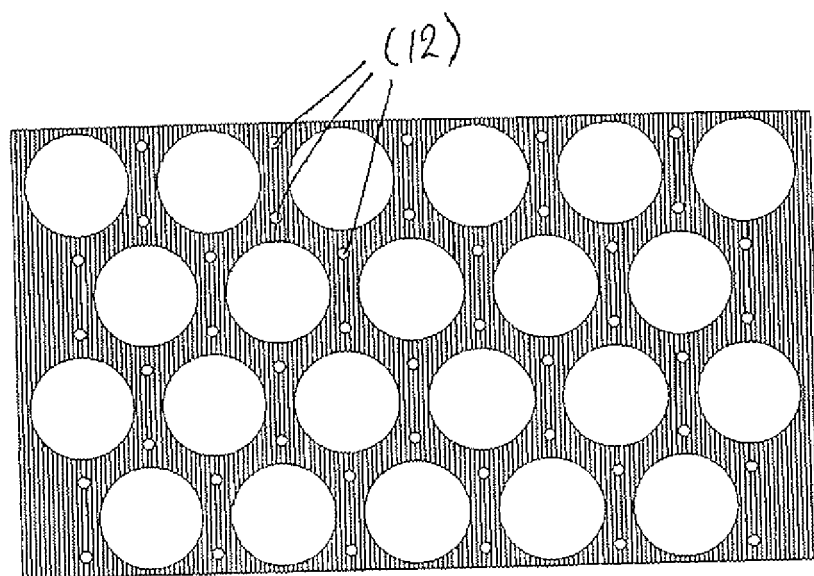


Fig. 12



【図13】

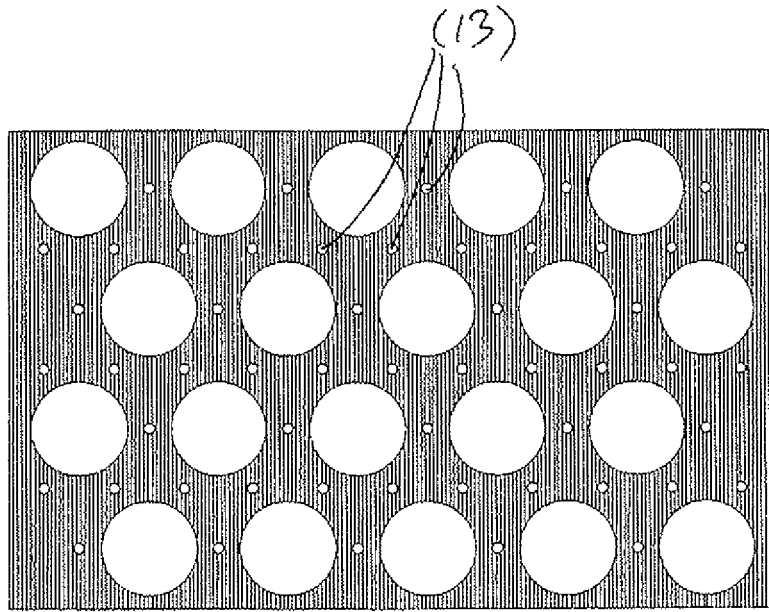


Fig. 13

【図14】

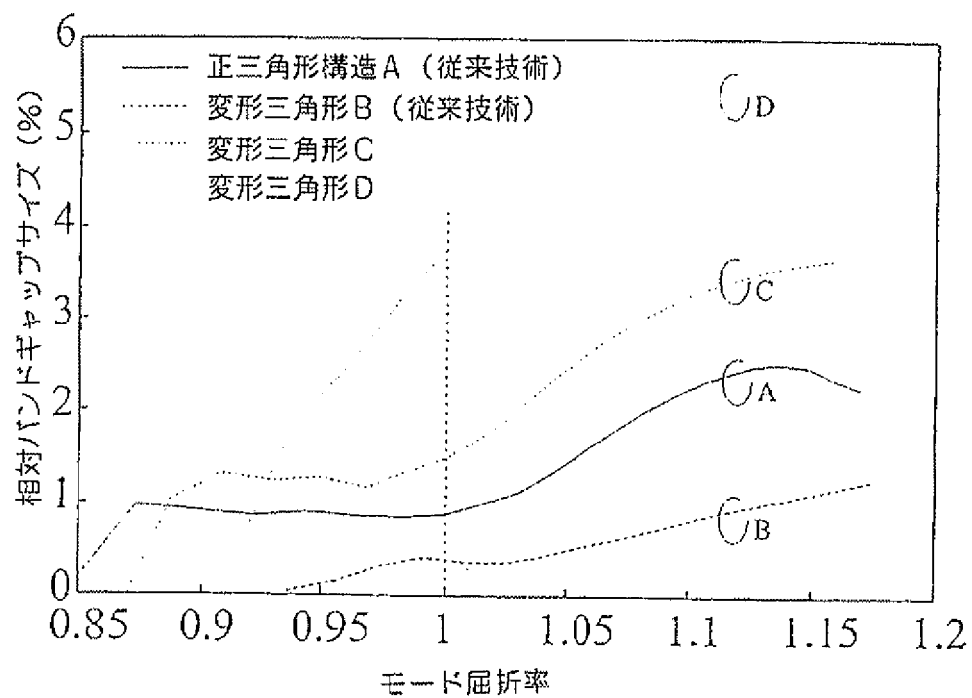


Fig. 14

【図15】

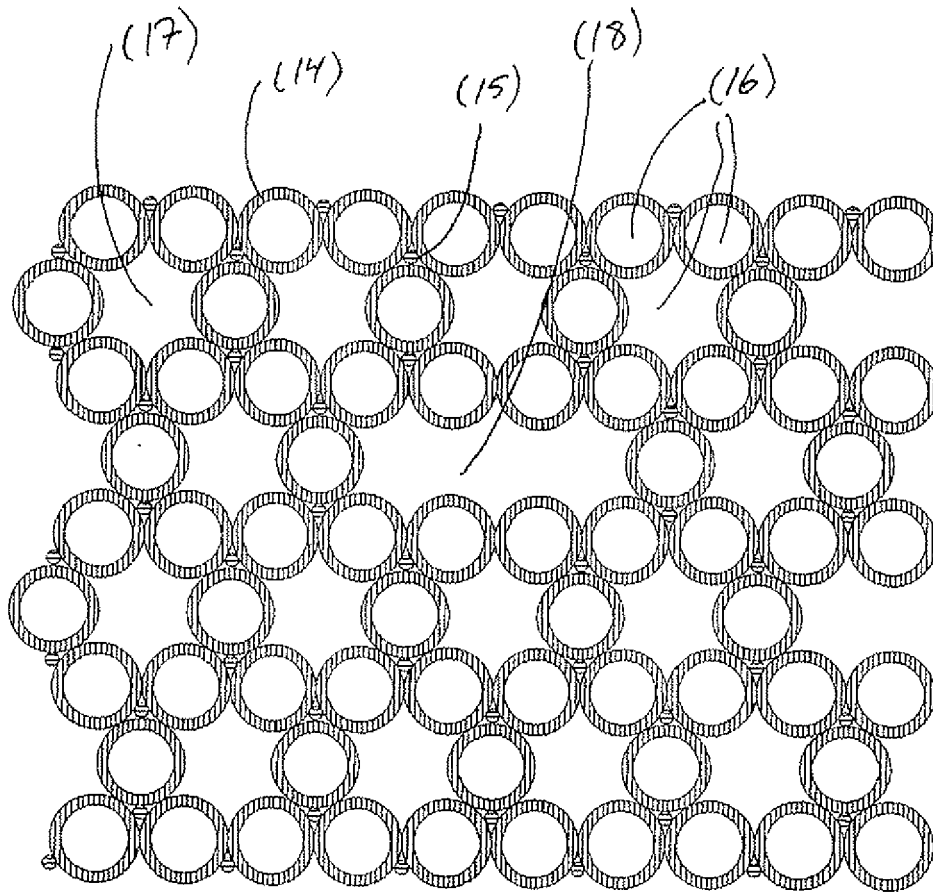


Fig. 15

【図16】

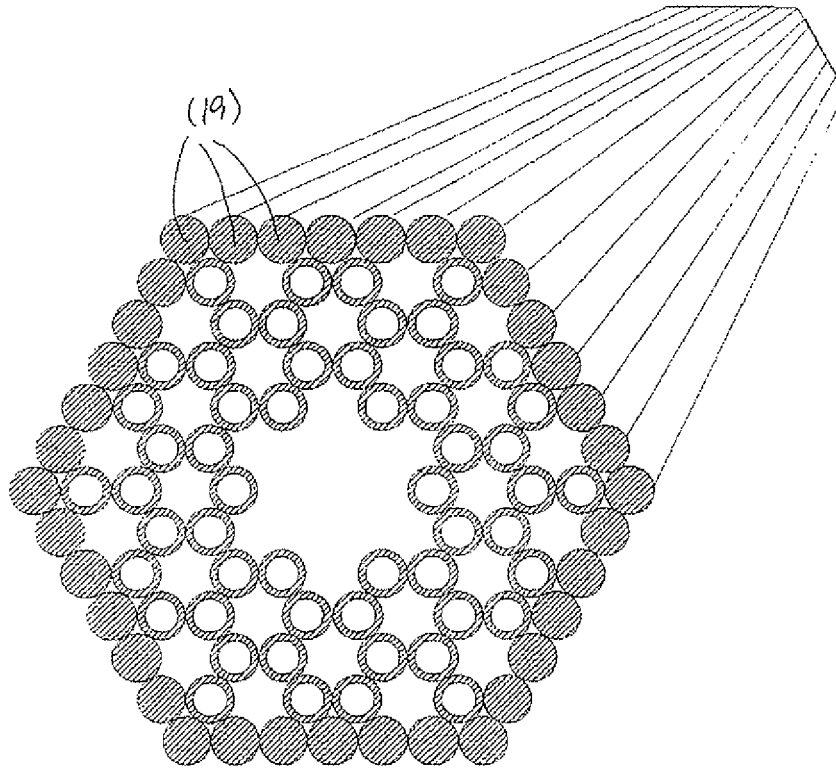


Fig. 16

【図17】

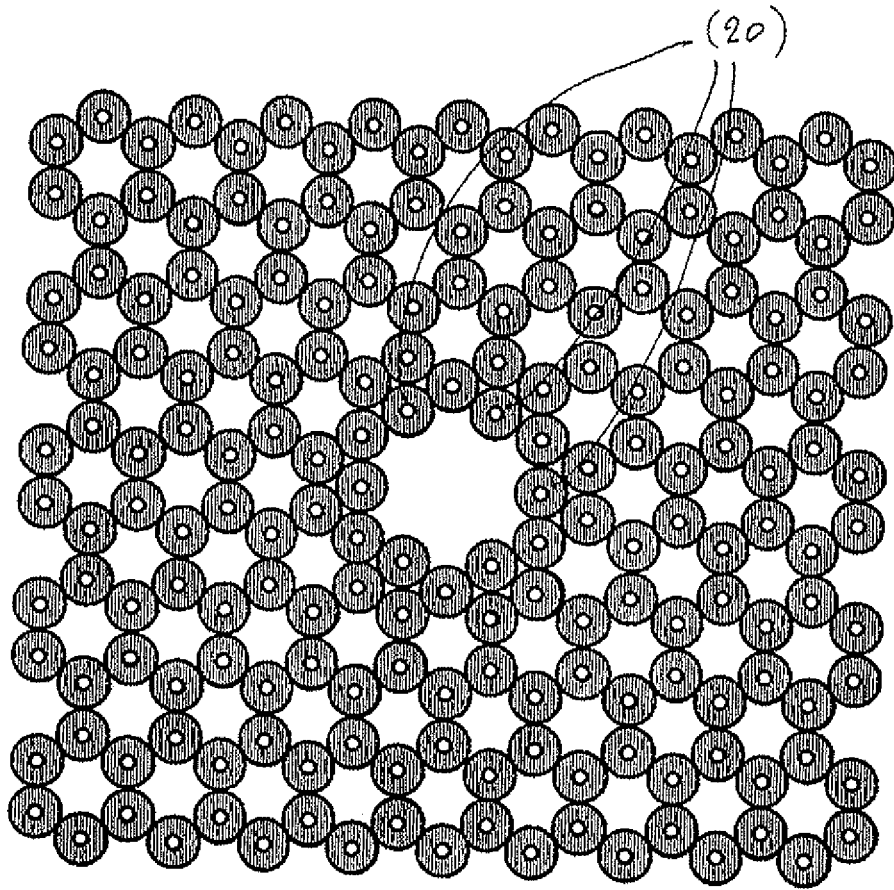


Fig. 17

【図18】

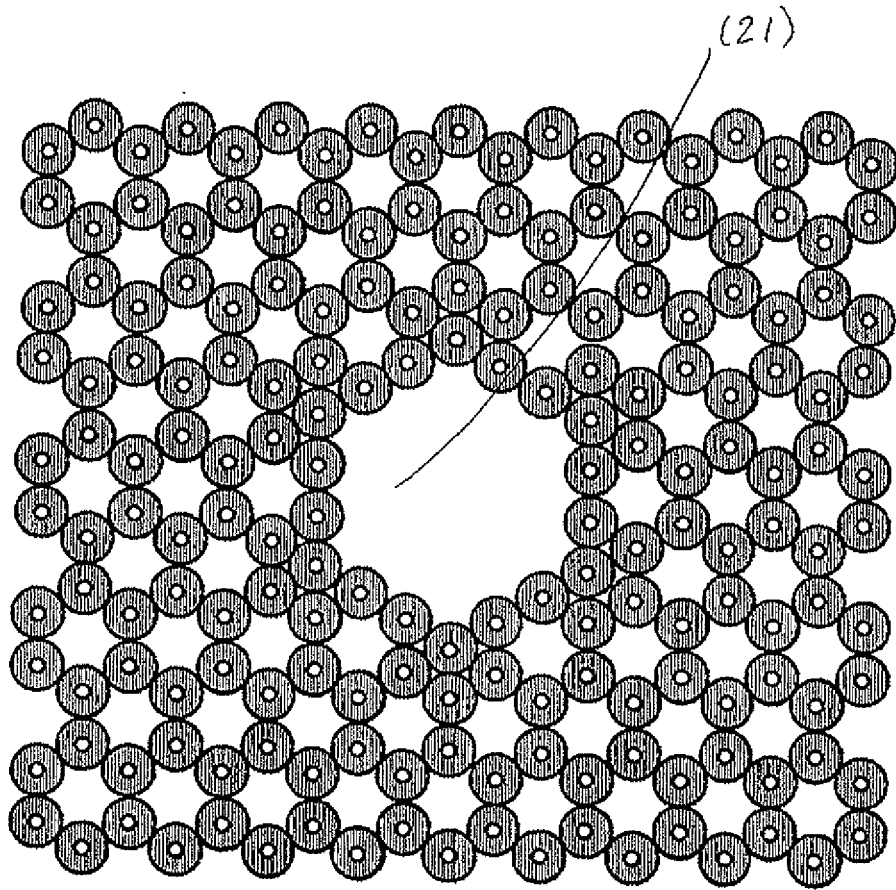


Fig. 18

【図19】

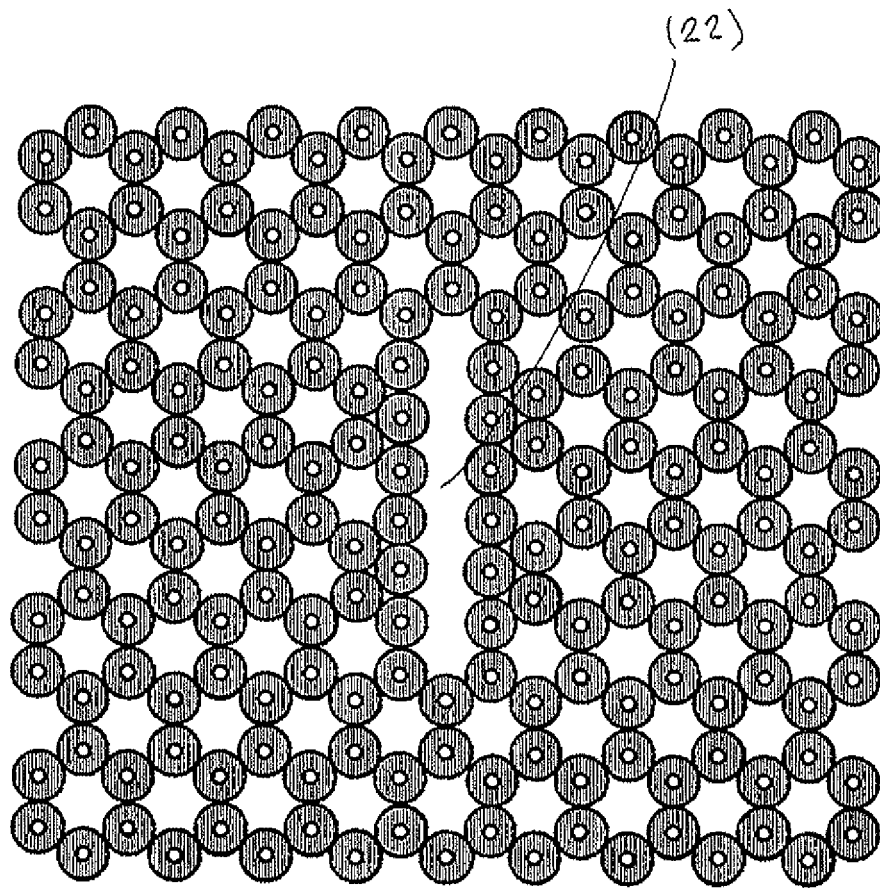


Fig. 19

【図20】

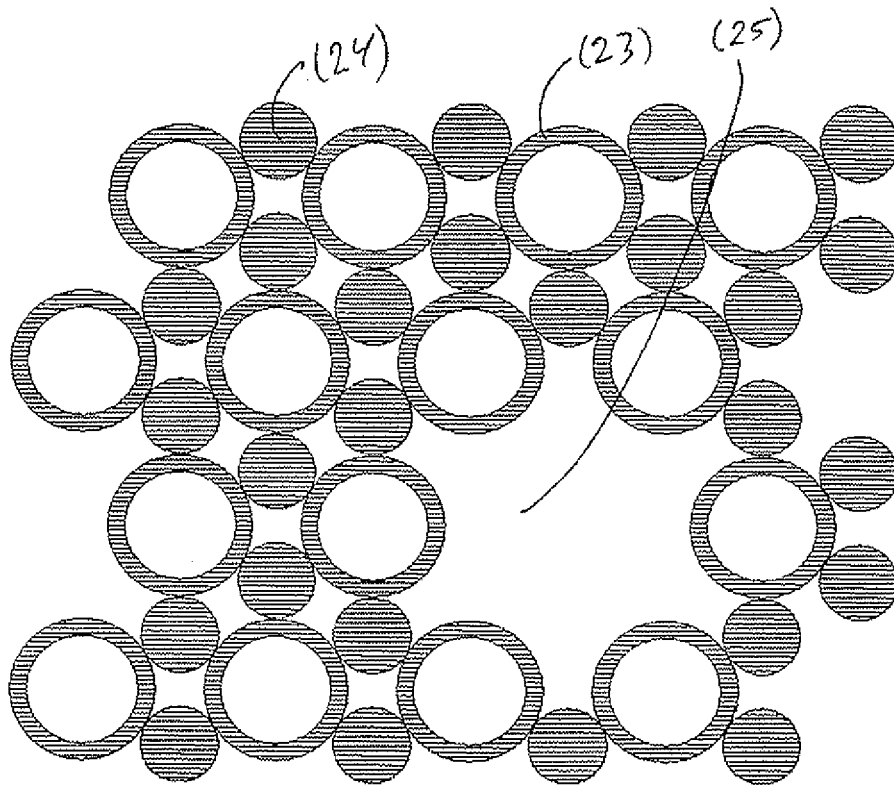
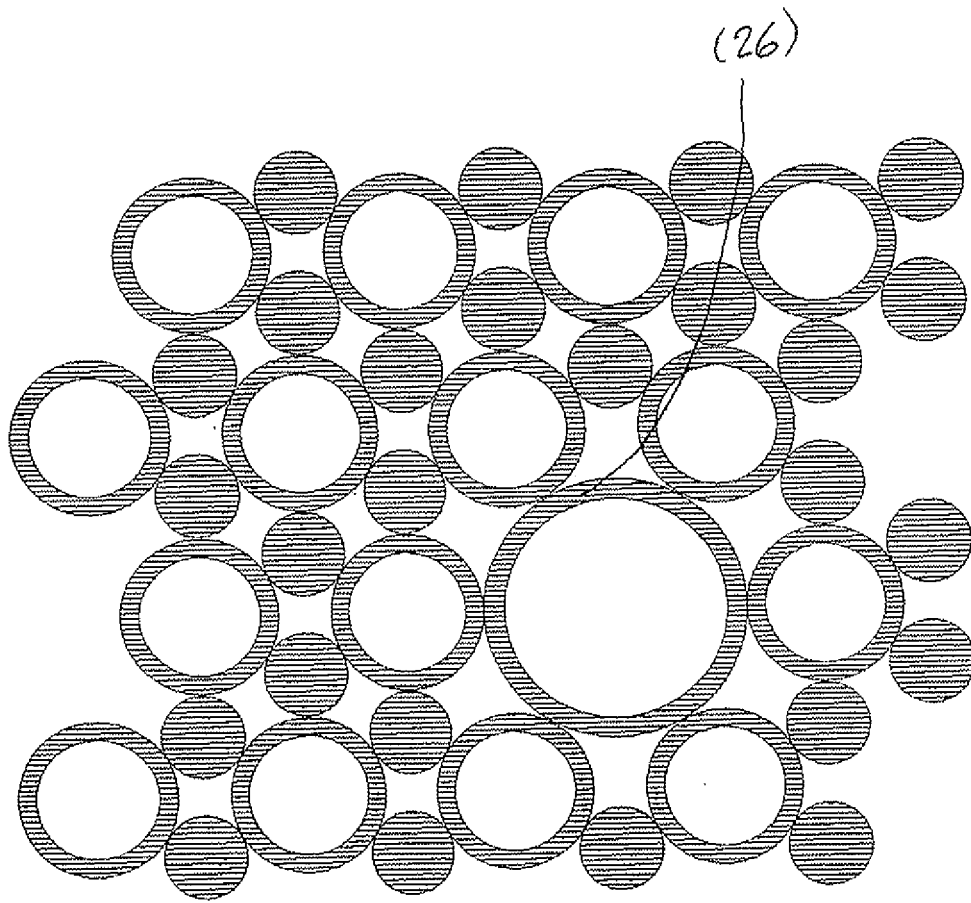


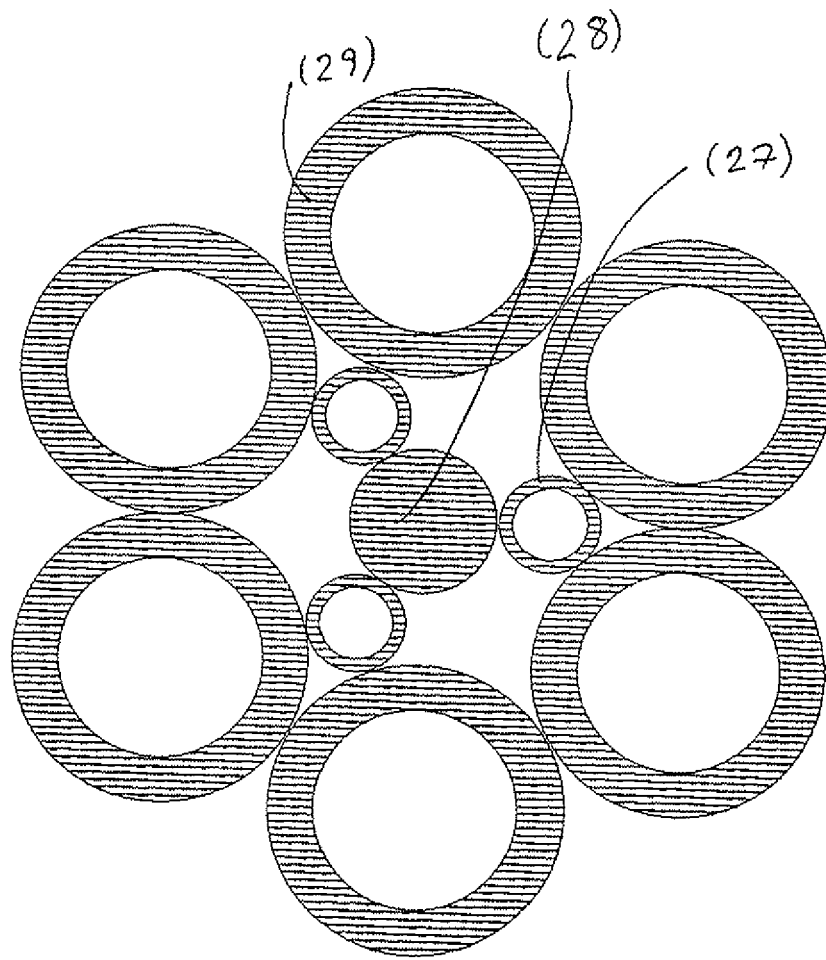
Fig. 20



【図21】

**Fig. 21**

【図22】

**Fig. 22**

【図23】

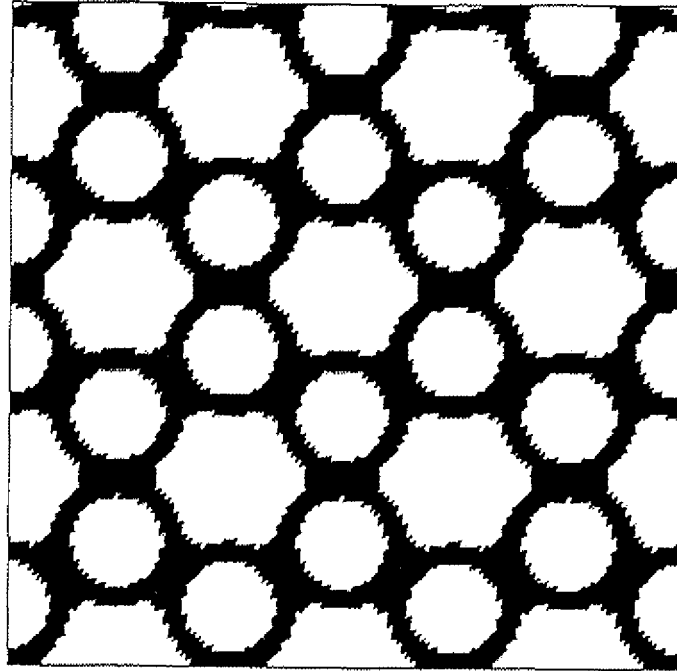


Fig. 23

【図24】

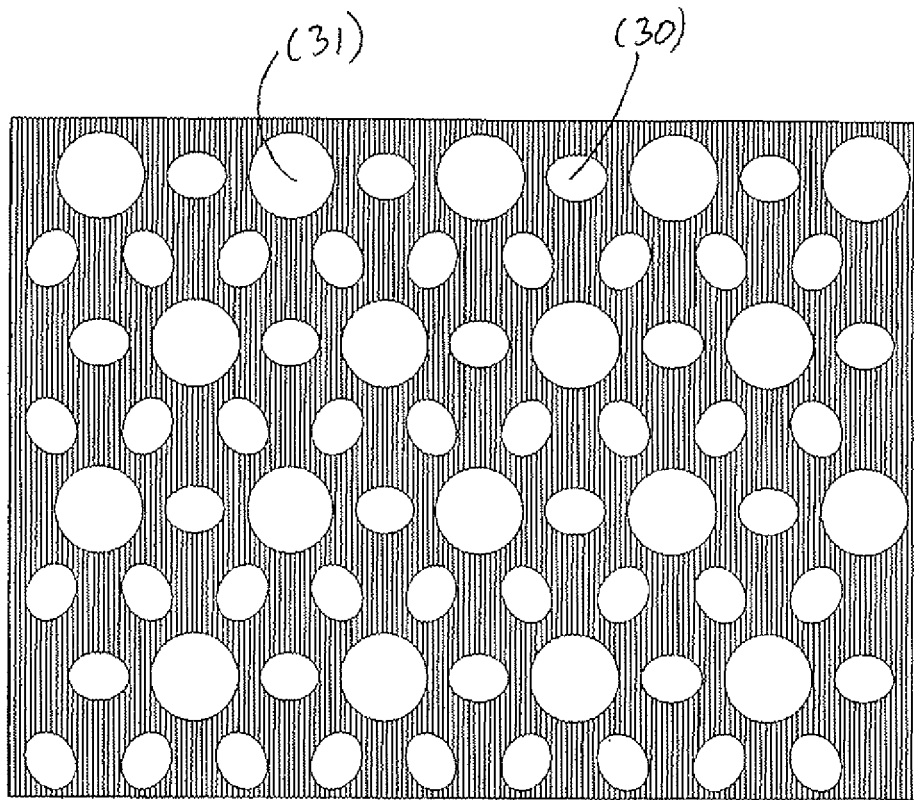


Fig. 24

【図25】

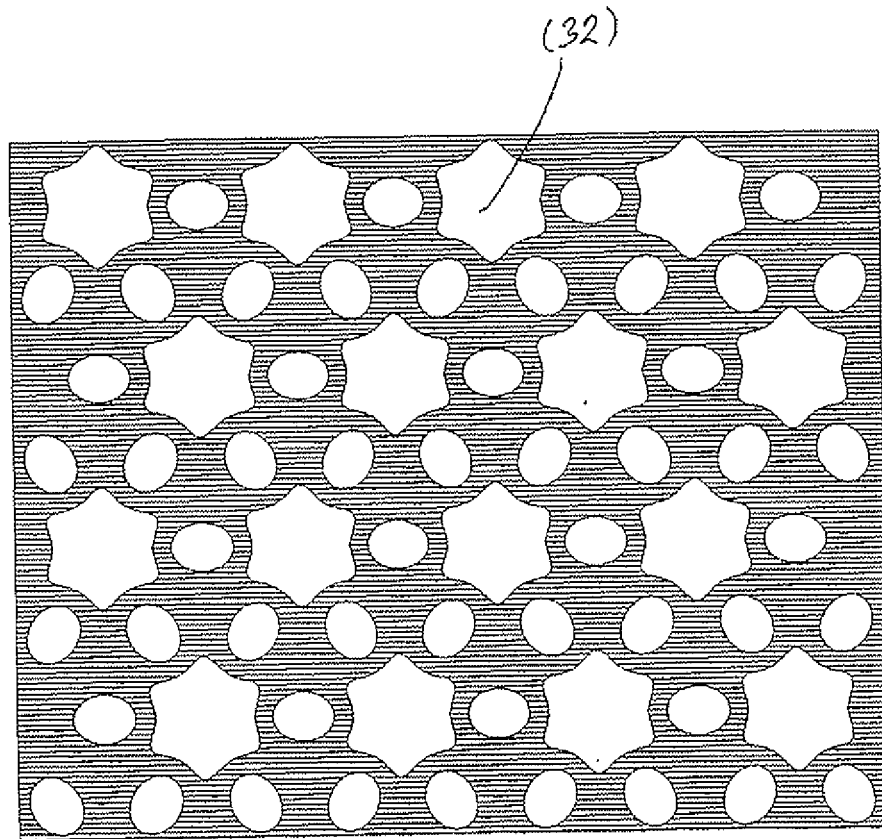


Fig. 25

【図26】

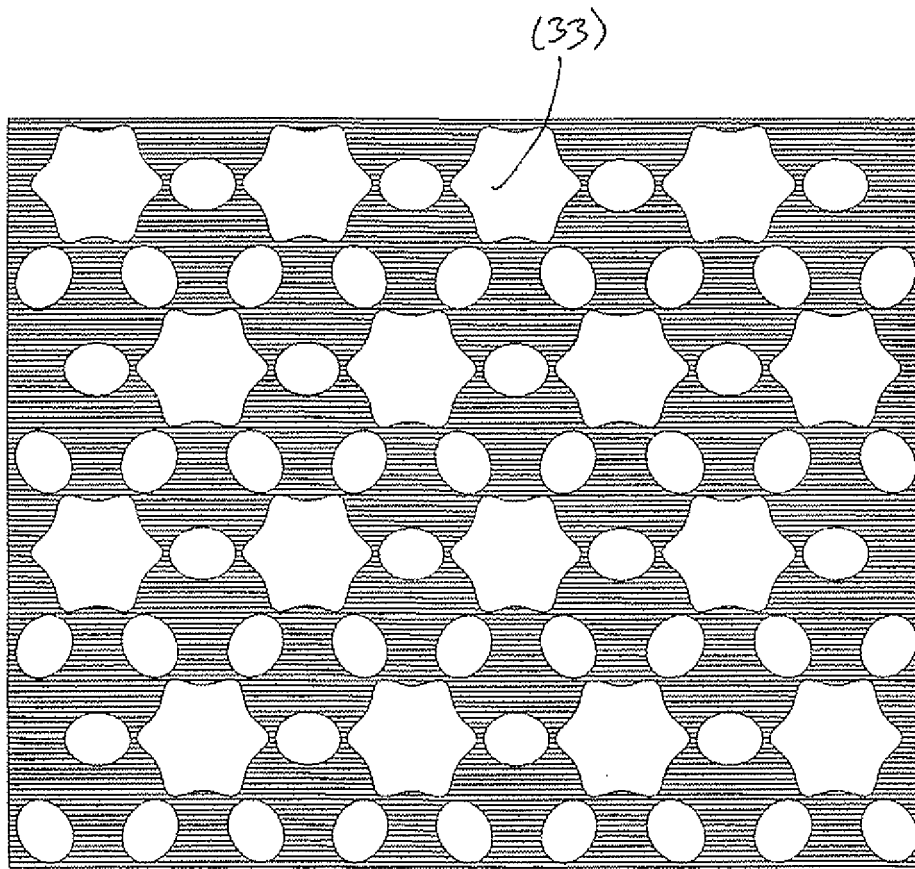


Fig. 26

【図27】

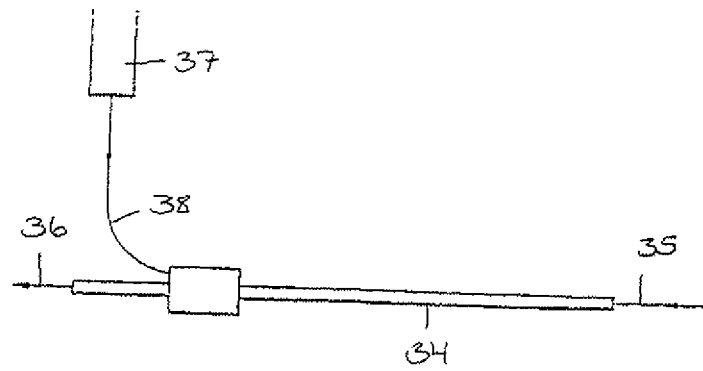


Fig. 27

【図28】

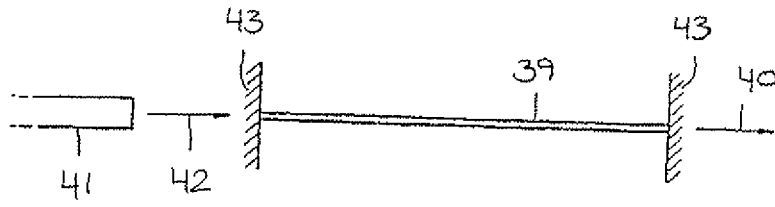


Fig. 28



## 【国際調査報告】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		International Application No. PCT/DK 99/00279	
IPC 6 G02B6/00			
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC			
B. FIELDS SEARCHED			
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 6 G02B			
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched			
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)			
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT			
Category *	Citation of document, with indicators, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	
A	RUSSELL P ST J ET AL: "Silica/air photonic crystal fibres" INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURE AND FUNCTIONAL OPTICAL PROPERTIES OF SILICA AND SILICA-RELATED GLASSES, SHIZUOKA, JAPAN, 10-11 JULY 1997, vol. suppl.37-1, pages 45-48, XP002111542 Japanese Journal of Applied Physics, Supplement, 1998, Publication Office, Japanese Journal Appl. Phys, Japan ISSN: 0021-4922 the whole document	1,11,24, 51,55, 61,66, 87-89	
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.			
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubt on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (not specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "Z" document member of the same patent family			
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report	
13 August 1999		31/08/1999	
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.O. Box 5310 Patankiln 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 631 ope nl Fax: (+31-70) 340-2016		Authorized officer  Jakober, F	

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.  
PCT/DK 99/00279

## C. (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>BIRKS T A ET AL: "Single-mode photonic crystal fiber with an indefinitely large core"</p> <p>TECHNICAL DIGEST. SUMMARIES OF PAPERS PRESENTED AT THE CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS. CONFERENCE EDITION. 1998 TECHNICAL DIGEST SERIES, VOL.6 (IEEE CAT. NO.98CH36178), TECHNICAL DIGEST SUMMARIES OF PAPERS PRESENTED AT THE CONFERENCE ON LASE, pages 226-227, XP002111549</p> <p>1998, Washington, DC, USA, Opt. Soc. America, USAISBN: 1-55752-339-0</p> <p>the whole document</p> <p>---</p>	<p>1,11,24, 51,55, 61,66, 87-89</p>
A	<p>BIRKS T A ET AL: "FULL 2-D PHOTONIC BANDGAPS IN SILICA/AIR STRUCTURES"</p> <p>ELECTRONICS LETTERS, vol. 31, no. 22, 26 October 1995 (1995-10-26), pages 1941-1943, XP000543391</p> <p>ISSN: 0013-5194</p> <p>the whole document</p> <p>---</p>	<p>1,11,24, 51,55, 61,66, 87-89</p>
A	<p>RUSSELL P S J ET AL: "Photonic crystal fibres"</p> <p>11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATED OPTICS AND OPTICAL FIBRE COMMUNICATIONS 23RD EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATIONS 100C-ECOC 97 (CONF. PUBL. NO.448), 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATED OPTICS AND OPTICAL FIBRE COMMUNICATI, vol. 1, 22 - 25 September 1997, pages 63-64, XP002111553</p> <p>1997, London, UK, IEE, UKISBN: 0-85296-697-0</p> <p>the whole document</p> <p>---</p>	<p>1,11,24, 51,55, 61,66, 87-89</p>
T	<p>KNIGHT J C ET AL: "Photonic crystals as optical fibres-physics and applications"</p> <p>MINIATURE COHERENT LIGHT SOURCES IN DIELECTRIC MEDIA, LES HOUCHEs, FRANCE, 2-6 JUNE 1997, vol. 11, no. 2-3, pages 143-151, XP002112150</p> <p>Optical Materials, Jan. 1999, Elsevier, Netherlands</p> <p>ISSN: 0925-3467</p> <p>the whole document</p> <p>----</p> <p>---/---</p>	<p>1,11,24, 51,55, 61,66, 87-89</p>

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int. Patent Application No.

PCT/DK 99/00279

## C. (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
T	BARKOU S E ET AL: "Silica-air photonic crystal fiber design that permits waveguiding by a true photonic bandgap effect" OPTICS LETTERS, 1 JAN. 1999, OPT. SOC. AMERICA, USA, vol. 24, no. 1, pages 46-48, XP000801368 ISSN: 0146-9592 the whole document	1,11,24, 51,55, 61,66, 87-89
T	BROENG J ET AL: "Highly increased photonic band gaps in silica/air structures" OPTICS COMMUNICATIONS, 15 NOV. 1998, ELSEVIER, NETHERLANDS, vol. 156, no. 4-6, pages 240-244, XP004143066 ISSN: 0030-4018 the whole document	1,11,24, 51,55, 61,66, 87-89

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1999)

フロントページの続き

(81)指定国 EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AP(GH, GM, KE, LS, MW, SD, SL, SZ, UG, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), AE, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW

(72)発明者 ビャルクレウ, アンデルス オバルガード  
デンマーク国, デーコーク 4000 ロスキル  
デ, グンデセマレ, エレビエルウバイ 5

Fターム(参考) 2H050 AB03Z AB05X AB18X AB42Z  
AC01 AC64 AC69 AC71 AD00  
AD03 AD06